

В

ДЛЯ ВУЗОВ

Б.М. Базров

ОСНОВЫ
ТЕХНОЛОГИИ
МАШИНОСТРОЕНИЯ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

В

ДЛЯ ВУЗОВ

Б.М. Базров

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Второе издание

*Допущено Министерством образования
Российской Федерации в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
бакалавров и магистров «Технология,
оборудование и автоматизация
машиностроительных производств»
и направлению подготовки дипломированных
специалистов «Конструкторско-технологическое
обеспечение машиностроительных производств»*



МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
2007

УДК 621.9

ББК 34.5

Б17

Рецензенты:

кафедра "Технология и металлорежущие системы автомобилестроения" МГИУ;
д-р техн. наук, проф. *В.М. Смелянский*

Базров Б.М.

Б17 Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов.
2-е изд. (1-е изд. 2005 г.). М.: Машиностроение, 2007. – 736 с.: ил.
ISBN 978-5-217-03374-4

В первом разделе изложены теоретические основы технологии машиностроения: понятийный аппарат; основы базирования; размерные и временные цепи; модульное описание изделия; основные закономерности технологических процессов, формирования качества изделия и затрат времени в процессе его изготовления; математическое описание и решение типовых технологических задач методом математического моделирования. Рассмотрены методы достижения заданного качества изделий, повышения производительности и эффективности изготовления изделий. *Во втором разделе* учебника изложены методические основы разработки технологических процессов сборки изделий и изготовления деталей с использованием принципов модульной технологии. *В третьем разделе* раскрываются основы технологической подготовки производства: основные функции, элементная база технологического обеспечения и вопросы автоматизации технологической подготовки.

Учебник предназначен для студентов машиностроительных вузов, технических университетов, может быть полезен аспирантам, а также работникам машиностроительных предприятий.

УДК 621.9

ББК 34.5

ISBN 978-5-217-03374-4

© Издательство "Машиностроение", 2007

© Базров Б.М., 2007

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	10
ВВЕДЕНИЕ	11
РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	18
Глава 1.1. Основные понятия и определения	18
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>25</i>
Глава 1.2. Машиностроительное изделие как объект экс- плуатации	26
1.2.1. Служебное назначение изделия	26
1.2.2. Изделие как совокупность функциональных модулей	27
1.2.3. Качество изделия	31
1.2.3.1. Геометрическая точность детали и изделия	37
1.2.3.2. Качество поверхностного слоя детали	42
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>46</i>
Глава 1.3. Пространственные и временные связи	47
1.3.1. Основы базирования	47
1.3.2. Размерные цепи	57
1.3.2.1. Методы достижения точности замыкающего звена	66
1.3.2.2. Расчет плоских размерных цепей	82
1.3.2.3. Пространственные размерные цепи	102
1.3.3. Временные цепи	109
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>116</i>
Глава 1.4. Машиностроительное изделие как объект производства	118
1.4.1. Модуль поверхностей (МП) детали	122
1.4.2. Чертеж детали в модульном представлении	133
1.4.3. Модуль соединения (МС) деталей	143
1.4.4. Распределение МП и МС в изделиях	152
1.4.5. Метод описания изделия как объекта производства	163

1.4.6. Описание бурового трехшарошечного долота в модульном исполнении	175
1.4.7. Технологичность изделия	199
✓ 1.4.8. Техничко-экономические показатели изготовления изделия	201
<i>Контрольные вопросы</i>	205
Глава 1.5. Основные положения и закономерности технологических процессов	206
1.5.1. Общие сведения	206
1.5.2. Элементная база технологических процессов	211
1.5.3. Виды технологических процессов	213
1.5.4. Явление рассеяния выходных показателей технологического процесса	223
1.5.5. Технологические размерные связи	228
1.5.6. Временные цепи технологических процессов	237
<i>Контрольные вопросы</i>	242
Глава 1.6. Закономерности образования отклонений качества изделия в процессе изготовления	243
1.6.1. Общие положения механизма образования геометрических погрешностей изделия	243
1.6.2. Образование геометрических погрешностей детали ...	260
1.6.2.1. Влияние упругих перемещений на точность изготовления детали	261
1.6.2.2. Влияние тепловых перемещений на точность изготовления детали	269
1.6.2.3. Влияние изнашивания элементов технологической системы на точность изготовления детали	276
1.6.2.4. Влияние остаточных напряжений на точность изготовления детали	279
1.6.3. Образование отклонений качества поверхностного слоя детали	282
1.6.3.1. Образование шероховатости поверхности детали	282
1.6.3.2. Образование отклонений физико-механических свойств поверхностного слоя детали	284

1.6.4. Образование погрешностей изготовления изделия на технологическом переходе	288
1.6.4.1. Образование погрешностей обработки детали на технологическом переходе	288
1.6.4.2. Образование погрешностей изделия в процессе сборки	298
1.6.5. Образование отклонений качества изделия на протяжении технологического процесса	306
1.6.6. Образование погрешностей измерения	312
<i>Контрольные вопросы</i>	327
Глава 1.7. Формирование затрат времени и себестоимости изготовления изделия	329
1.7.1. Затраты времени на осуществление технологического процесса	329
✓ 1.7.2. Образование себестоимости изготовления изделия	333
<i>Контрольные вопросы</i>	336
Глава 1.8. Математическое описание закономерностей технологического процесса	337
1.8.1. Общие положения	337
1.8.2. Метод координатных систем с деформирующимися связями	341
1.8.3. Построение модели формирования геометрии детали методом координатных систем с деформирующимися связями	344
1.8.4. Пример построения модели образования погрешности обработки детали	367
1.8.4.1. Построение математической модели механизма образования погрешности статической настройки	372
1.8.4.2. Построение математической модели механизма образования погрешности динамической настройки	377
1.8.5. Математическое описание процесса сборки	385

1.8.6. Построение вероятностных моделей технологического процесса	390
<i>Контрольные вопросы</i>	397
Глава 1.9. Расчеты на точность методом математического моделирования	398
1.9.1. Выбор режима обработки, обеспечивающего заданную точность	399
1.9.2. Выбор варианта схемы базирования заготовки	413
1.9.3. Выбор относительного положения инструментов в многоинструментной наладке	417
1.9.4. Исследование точности обработки методом математического моделирования	430
1.9.4.1. Исследование влияния элементов режима обработки на точность	431
1.9.4.2. Исследование влияния силового фактора на точность обработки	433
1.9.4.3. Исследование влияния жесткости технологической системы на точность обработки	437
1.9.4.4. Исследование влияния последовательности приложения силового замыкания на точность установки	439
1.9.5. Выбор метода достижения точности замыкающего звена размерной цепи	446
<i>Контрольные вопросы</i>	452
Глава 1.10. Основы достижения качества изготовления изделия на технологическом переходе	453
1.10.1. Повышение качества технологической системы	453
1.10.2. Подавление действующих факторов	461
1.10.3. Управление ходом технологического процесса	465
1.10.3.1. Настройка технологической системы	466
1.10.3.2. Поднастройка технологической системы	479
<i>Контрольные вопросы</i>	502
Глава 1.11. Основы достижения качества изделия на протяжении технологического процесса	504
1.11.1. Снижение взаимного влияния технологических переходов на качество детали	505

1.11.2. Расчет межпереходных размеров и припусков на обработку.....	513
1.11.3. Расчет допусков на операционные размеры при несовпадении технологических баз с конструкторскими базами	520
1.11.4. Снижение влияния на точность обработки смены технологических баз	523
<i>Контрольные вопросы</i>	528
Глава 1.12. Технологические основы сокращения затрат времени на осуществление технологического процесса ...	529
1.12.1. Сокращение затрат времени за счет совершенствования структуры технологического процесса	530
1.12.2. Сокращение затрат подготовительно-заключительного времени	534
1.12.3. Сокращение затрат штучного времени	536
<i>Контрольные вопросы</i>	554
Глава 1.13. Пути повышения эффективности производства изделий	555
1.13.1. Снижение себестоимости изготовления изделия	556
1.13.2. Методы снижения разнообразия объектов в машиностроительном производстве	563
1.13.2.1. Системный подход в унификации объектов в машиностроительном производстве	566
1.13.3. Повышение технологичности изделия	573
1.13.4. Автоматизация производства	579
1.13.5. Совершенствование организации производственного процесса	585
<i>Контрольные вопросы</i>	596
РАЗДЕЛ 2. ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ	598
Глава 2.1. Постановка задачи. Последовательность разработки технологического процесса изготовления изделия ...	598
2.1.1. Исходные данные	598
2.1.2. Объект производства	600

2.1.3. Последовательность разработки технологического процесса	604
<i>Контрольные вопросы</i>	607
Глава 2.2. Основы разработки технологического процесса сборки изделия	608
2.2.1. Анализ служебного назначения изделия и изучение его конструкции	609
2.2.2. Анализ соответствия технических требований, норм точности служебному назначению изделия	612
2.2.3. Выбор вида и организационной формы производственного процесса сборки изделия	613
2.2.4. Выбор методов достижения точности изделия и его контроля	618
2.2.5. Разработка модулей технологических процессов сборки МС	626
2.2.6. Разработка технологического маршрута и операций сборки изделия	631
2.2.7. Выбор средств облегчения труда	639
2.2.8. Нормирование процесса сборки и оформление технологической документации	641
<i>Контрольные вопросы</i>	645
Глава 2.3. Основы разработки технологического процесса изготовления детали	646
2.3.1. Изучение служебного назначения детали, ее конструкции и анализ технических требований	647
2.3.2. Выбор вида и организационной формы производственного процесса изготовления детали	655
2.3.3. Выбор метода получения заготовки	657
2.3.4. Анализ технологичности конструкции детали и формирование интегральных модулей поверхностей	664
2.3.5. Разработка технологического процесса изготовления детали	669

2.3.5.1. Общие положения по выбору технологических баз	670
2.3.5.2. Разработка маршрута технологического процесса	676
2.3.5.3. Разработка технологической операции	691
<i>Контрольные вопросы</i>	698
РАЗДЕЛ 3. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА	699
Глава 3.1. Цель, задачи и содержание ТПП	699
<i>Контрольные вопросы</i>	705
Глава 3.2. Основные функции технологической подготовки производства	706
3.2.1. Обеспечение технологичности изделия	706
3.2.2. Разработка технологических процессов	709
3.2.3. Проектирование и изготовление средств технологического оснащения	713
3.2.4. Организация контроля и управления технологическими процессами	714
<i>Контрольные вопросы</i>	715
Глава 3.3. Элементная база технологического обеспечения	716
3.3.1. Общие сведения об элементной базе	716
3.3.2. Состояние элементной базы технологического обеспечения механосборочного производства	719
3.3.3. Построение элементной базы технологического обеспечения на модульном уровне	722
<i>Контрольные вопросы</i>	726
Глава 3.4. Автоматизация технологической подготовки производства	727
3.4.1. Автоматизация разработки технологических процессов	728
3.4.2. Автоматизация поиска технологической информации	731
3.4.3. Автоматизация проектирования технологической оснастки	733
<i>Контрольные вопросы</i>	735
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	736

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСТПП	–	автоматизированная система технологической подготовки производства
ЕСКД	–	единая система конструкторской документации
ЕСТПП	–	единая система технологической подготовки производства
ИСП	–	информационно-поисковая система
МФТ	–	модуль функциональный технологический
МФО	–	модуль функциональный обслуживающий
МП	–	модуль поверхностей детали
МПБ	–	модуль поверхностей базирующий
МПр	–	модуль поверхностей рабочий
МПС	–	модуль поверхностей связующий
МТП	–	модульный технологический процесс
МТИ	–	модуль технологического процесса изготовления МП
МТС	–	модуль технологического процесса сборки МС
МТБ	–	модуль технологических баз
МО	–	модуль технологического оборудования
МИ	–	модуль инструментальной наладки
МПр	–	модуль приспособления
МКИ	–	модуль контрольно-измерительного устройства
СТО	–	средства технологического оснащения
ТС	–	технологическая система
У-Н-О	–	установочная – направляющая – опорная базы
У-ДО-О	–	установочная – двойная опорная – опорная базы
ДН-О-О	–	двойная направляющая – опорная – опорная базы
ДН-ДО	–	двойная направляющая – двойная опорная базы
РМ	–	рабочее место

ВВЕДЕНИЕ

Отрасль науки, занимающаяся исследованием закономерностей технологических процессов изготовления машиностроительных изделий, с целью использования результатов изучения для обеспечения требуемого качества и количества изделий с наивысшими технико-экономическими показателями, называется **технологией машиностроения**.

Объектом технологии машиностроения является технологический процесс, а предметом – установление и исследование внешних и внутренних связей, закономерностей технологического процесса. Только на основе их глубокого изучения возможно построение прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих изготовление изделий высокого качества с минимальными затратами.

Современная технология развивается по следующим основным направлениям: создание новых материалов; разработка новых технологических принципов, методов, процессов, оборудования; механизация и автоматизация технологических процессов, устраняющая непосредственное участие в них человека. Технологический процесс и орудия труда тесно взаимосвязаны. Если осуществление технологического процесса порождает необходимость изготовления орудий труда, являясь причиной их появления, то развитие и совершенствование орудий труда в свою очередь стимулирует совершенствование самого процесса. Формирование технологии машиностроения как отрасли знания началось с появлением крупного машиностроения. Большой вклад в ее развитие внесли русские умельцы Андрей Чохов, М.В. Сидоров, Я. Батищев, А.К. Нартов и многие другие. Так, например, А.К. Нартов (1680 – 1756 гг.) разработал ряд технологических процессов изготовления оружия, монет, создал для этого оригинальные станки и инструменты.

Одним из первых, описавшим накопленный опыт в технологии машиностроения, был профессор Московского Университета И. Двигубский. В 1807 г. он написал книгу "Начальные основания технологии или краткое описание работ на заводах и фабриках производимых". В 1885 г. вышла работа профессора И.И. Тиме (1838 – 1920 гг.) "Основы машиностроения, организация машиностроительных фабрик в техническом и экономическом отношении и производство работ". И, наконец, была из-

дана книга проф. А.П. Гавриленко (1861 – 1914 гг.) "Технология металлов", в которой обобщен опыт развития технологии металлообработки. Долгие годы этот учебник был основным пособием, по которому училось несколько поколений русских инженеров.

В связи с бурным развитием техники в начале XX века возникла необходимость обобщения опыта по разработке и осуществлению технологических процессов. В учебные программы вузов страны были включены дисциплины, описывающие технологические процессы изготовления машин, проектирование приспособлений, цехов и заводов (например "Технология автомобилестроения", "Технология тракторостроения", "Технология станкостроения" и др.). На первом этапе они содержали, главным образом, описательный материал, обобщающий опыт изготовления изделий в отрасли.

По мере развития машиностроения, дальнейшего изучения технологии стали выявляться общие закономерности, появились широкие обобщения, справедливые для различных отраслей машиностроения. В итоге были сформированы такие технологические дисциплины как основы технологии машиностроения, конструирования приспособлений, проектирования машиностроительных цехов и заводов, а также автоматизация производственных процессов и ряд других. В курсе "Основы технологии машиностроения" излагаются общие вопросы для всех отраслей машиностроения, и постепенно он стал общинженерной дисциплиной, читаемой студентам всех специальностей машиностроительных вузов. В специальной части курса "Технология машиностроения" рассматриваются, главным образом, вопросы, специфичные для данной отрасли машиностроения и касающиеся изготовления основных деталей и сборки машин этой отрасли.

Технология машиностроения стала формироваться как отрасль науки на основе обобщения результатов большого труда коллективов заводов, научно-исследовательских институтов, высших учебных заведений и работников науки и промышленности. Основы технологии машиностроения были созданы, главным образом, трудами советских ученых: Б.С. Балакшина, Н.А. Бородачева, К.В. Вотинова, В.И. Дементьева, Ф.С. Деменьюка, М.Е. Егорова, А.А. Зыкова, А.И. Каширина, В.М. Кована, В.С. Корсакова, А.А. Маталина, С.П. Митрофанова, Э.Б. Рыжова, Э.А. Сателя, А.П. Соколовского, Д.В. Чарнко, А. Б. Яхина и многих других.

Наука о технологии – это не просто сумма каких-то знаний о технологических процессах, а система строго сформулированных и проверенных положений о явлениях и их глубинных связях, выраженных посредством особых понятий. С другой стороны, наука о технологии, как и любая другая отрасль знания, – это результат практической деятельности человека; она подчинена целям развития общественной практики и способна служить теоретической основой.

Если наука – система научных знаний, то процесс приобретения этих знаний является научным познанием. В процессе становления научного познания в области технологии машиностроения можно выделить три стадии: зарождение и развитие эмпирического исследования и первоначальное накопление эмпирических знаний о технологических процессах; зарождение первой научной картины совокупности явлений, имеющих место при осуществлении технологических процессов; построение теорий.

Становление технологии машиностроения как научной дисциплины затруднено огромным разнообразием объектов производства (от миниатюрных приборов до экскаваторов, от простейших изделий типа молотка до сложнейших машин – таких, как космический корабль), бесчисленным множеством методов изготовления и оборудования для их осуществления. Поэтому развитие научных основ технологии машиностроения долгое время находилось на стадии эмпирического исследования.

Постепенное накопление данных эмпирических исследований технологических процессов, выявление отдельных фактов, связей между явлениями, выдвижение различных идей и гипотез позволило сформировать технологию как науку.

На этой основе создано учение о точности обработки деталей, раскрыты закономерности размерных и временных связей технологических процессов, разработаны расчетные методы, сформулирована система основных понятий и определений, создана методика разработки технологических процессов и др.

К одному из первых фундаментальных трудов по основам технологии машиностроения следует отнести учебник проф. Б.С. Балакшина "Технология станкостроения" [6] и книгу проф. А.П. Соколовского "Научные основы технологии машиностроения" [11].

Развитие машиностроения ставит новые проблемы, связанные с повышением качества изделий, производительности труда и требует их раз-

решения. Современное машиностроение используется практически во всех сферах человеческой деятельности, достигло огромных успехов в повышении ее эффективности и в итоге превратилось в технологическую базу промышленности, определяющую уровень технического развития страны и ее безопасности.

В развитии промышленного производства, в том числе и машиностроения, можно выделить две эры: индустриальную и информационную. Первая прошла свой путь развития, начиная с прошлого века, и характеризуется преимущественным развитием отраслей материального производства и, в первую очередь, промышленности. Само производство в значительной степени стало массовым, крупносерийным, ориентированным на рынки большой емкости и на изделия массового спроса.

На смену индустриальной эры пришла информационная эра, переход к которой в ведущих странах Запада начался в 50 – 60-е годы прошлого столетия и завершился в наиболее экономически развитых странах мира к середине 80-х гг.

В эру индустриализации основным фактором повышения эффективности производства была преимущественно экономия затрат живого труда в самых различных сферах. Повышение эффективности использования прошлого труда (производственных фондов, материально-энергетических затрат) осуществлялось, в основном, в форме "экономии на масштабах производства", снижения затрат ресурсов на единицу конечной продукции за счет повышения удельной мощности технологического оборудования и др.

Информационную эру отличает преимущественный рост экономики, сферы услуг (как в валовом продукте, так и в численности занятых), особенно для отраслей, связанных с переработкой информации и осуществлением посреднической деятельности всех видов.

Производство в информационную эру становится в высшей степени гибким, не массовым, ориентируется на индивидуальные запросы потребителей и небольшие по емкости рынки сбыта.

Прошли времена, когда предприятие могло выпускать одну и ту же продукцию десятилетиями. Сегодня в самых современных отраслях промышленности (например, в электронике) жизненный цикл изделия сокращается до нескольких месяцев. Если же говорить о машиностроении, то в нем в среднем за три-пять лет необходимы полная замена выпускае-

мых изделий и смена средств технологического обеспечения (технологических процессов, оборудования, оснастки).

Таким образом, четко видна тенденция сокращения жизненного цикла изделия, обусловленная стремлением производителей быстрее и максимально полнее удовлетворять потребности общества, что, в свою очередь, стимулирует рост этих потребностей. Непрерывно растущие потребности общества порождают рост разнообразия машиностроительных изделий, их назначения. Необходимость выпуска конкурентоспособной продукции усиливает эту тенденцию и требует непрерывного совершенствования технологических процессов и средств технологического оснащения.

Современное предприятие должно быть способным быстро переходить на выпуск новых изделий повышенного качества с минимальными издержками. Сложность решения этой задачи усугубляется тем, что номенклатура выпускаемых изделий и объемы серий в определенной степени являются непредсказуемыми. Это не говорит о полном отсутствии планирования выпуска продукции предприятием – просто планирование строится на основе прогноза сбыта продукции. Главное отличие планирования в условиях рынка от централизованного директивного планирования заключается в ориентации производства на конкретного потребителя и даже на общественные явления и политические процессы.

Естественно, что роль случайных и неучтенных факторов в прогнозе достаточно велика и поэтому прогноз носит вероятностный характер, в результате годовая программа производства достаточно непредсказуема.

Работа современного предприятия в динамично изменяющихся условиях заставляет решать "взаимоисключающие" задачи: быстро переходить на выпуск новой продукции и одновременно внедрять новые технологии и технику; повышать качество изделий и снижать издержки производства.

В связи с непрерывно растущими требованиями к качеству изделий, быстрой смене выпускаемых изделий непрерывно растет объем технологической подготовки производства в единицу времени. Таким образом, возникает проблема, заключающаяся в том, что технолог в современных условиях должен выполнять в единицу времени не только больший объем работ, но и делать ее на более качественном уровне.

Решение этой проблемы лежит в автоматизации труда технолога, а это, в свою очередь, требует дальнейшего развития научных основ технологии машиностроения. Все это должно идти в направлении более глубокого изучения закономерностей технологических процессов, повышения уровня обобщений, формализации результатов исследований, применения математических методов, совершенствования методов расчета и разработки технологических процессов, проектирования средств технологического оснащения, методов организации технологической подготовки производства.

В процессе эволюции технологии машиностроения сформировались различные формы организации технологических процессов, основу которых составляют три вида технологий: единичная, типовая и групповая, имеющие свои достоинства и недостатки.

С начала становления машиностроения применялась единичная технология, когда под изготовление изделия разрабатывался единичный технологический процесс. *Единичный технологический процесс* позволяет учесть все особенности конкретного изделия и производственные условия, но требует много времени на его разработку.

С целью сокращения трудоемкости разработки технологических процессов и распространения передового опыта по предприятиям была разработана *типовая технология*, основоположником которой является профессор А.П. Соколовский.

Групповая технология, основоположником которой является профессор С.П. Митрофанов [9], разработана с целью повышения эффективности производства изделий широкой номенклатуры. При групповой технологии разные изделия объединяются в группы по общности оборудования и оснастки для осуществления одной и той же операции, что повышает однородность труда при изготовлении разных изделий и позволяет поднять его производительность.

С расширением номенклатуры выпускаемых изделий, снижением жизненного цикла рассмотренные выше виды технологий уже не удовлетворяют требованиям производства, поэтому назрела острая необходимость поиска нового вида технологии, позволяющей существенно снизить сроки технологической подготовки производства и поднять ее эффективность.

Перспективным в этом отношении является новый вид технологии – *модульная технология* [3]. Она базируется на сквозном применении модульного принципа в конструкторско-технологической подготовке

производства, когда изделие представляется совокупностью модулей, а под изготовление этих модулей разрабатываются модули технологического процесса; в свою очередь под осуществление последних создаются модули технологического оборудования и оснастки. Такой подход позволяет на каждом предприятии организовывать на модульном уровне элементную базу технологических процессов, оборудования и оснастки и из них методом компоновки строить технологические процессы, системы и приспособления.

Получаемый *модульный технологический процесс* объединяет в себе достоинства единичной, типовой и групповой технологий, поскольку учитывает все особенности конкретного изделия так же, как и единичный процесс. Идея типизации реализуется на уровне модулей технологического процесса и так же, как и при групповой технологии, изделия объединяются в группы по общности в них модулей, но (в отличие от групповой технологии) в этом случае не возникает трудностей в группировании изделий.

В учебнике развивается методологический подход изложения основ технологии машиностроения, разработанный профессором Борисом Сергеевичем Балаксиным с 1946 по 1976 гг., возглавлявшим кафедру технологии машиностроения Московского станкоинструментального института.

Учебник состоит из трех разделов:

раздел 1 – теоретические основы технологии машиностроения;

раздел 2 – основы разработки технологического процесса изготовления изделий;

раздел 3 – основы технологической подготовки производства.

В результате изучения дисциплины "Основы технологии машиностроения" студент должен не только уметь разрабатывать технологические процессы, но и владеть методами технологической подготовки производства. К сожалению, вопросы технологической подготовки производства в учебниках по основам технологии машиностроения или отсутствуют, или излагаются фрагментарно. В итоге у студентов не создается цельного представления о сущности и методах технологической подготовки производства. В связи с изложенным в учебник введен третий раздел "Основы технологической подготовки производства", в котором излагаются цель, задачи, функции, методы организации и автоматизации технологической подготовки производства.

Раздел 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Глава 1.1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В машиностроении **изделием** называется предмет производства, подлежащий изготовлению. В качестве изделия выступает машина, устройство, механизм, инструмент и т.п. и их составные части: сборочная единица, деталь.

Сборочная единица – это изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии обособленно от других элементов изделия.

Сборочная единица в зависимости от конструкции может состоять либо из отдельных деталей, либо включать сборочные единицы более высоких порядков и детали. Различают сборочные единицы первого, второго и более высоких порядков. Сборочная единица первого порядка входит непосредственно в изделие. Она состоит либо из отдельных деталей, либо из одной или нескольких сборочных единиц второго порядка и деталей. Сборочная единица второго порядка расчленяется на детали или сборочные единицы третьего порядка и детали и т.д. *Сборочная единица наивысшего порядка расчленяется только на детали.* Рассмотренное деление изделия на составные части производится по технологическому признаку.

Деталь – это изделие, изготавливаемое из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций. Характерный признак детали – отсутствие в ней разъемных и неразъемных соединений. Деталь представляет собой комплекс взаимосвязанных поверхностей, выполняющих различные функции при эксплуатации машины.

Производственный процесс – это совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта продукции. Например, производственный процесс изготовления машины включает не только изготовление деталей и их сборку, но и добычу руды, ее транспортирование, превращение в металл, получение заготовок из металла. В машиностроении производственный процесс

представляет собой часть общего производственного процесса и состоит из трех этапов: получение заготовки; преобразование заготовки в деталь; сборка изделия. В зависимости от конкретных условий перечисленные три этапа можно осуществлять на разных предприятиях, в разных цехах одного предприятия и даже в одном цехе.

Технологический процесс – часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и(или) определению состояния предмета труда. Под изменением состояния предмета труда понимается изменение его физических, химических, механических свойств, геометрии, внешнего вида. Кроме того, в технологический процесс включены дополнительные действия, непосредственно связанные или сопутствующие качественному изменению объекта производства; к ним относят контроль качества, транспортирование и др. Для осуществления технологического процесса необходима совокупность орудий производства, называемых средствами технологического оснащения, и рабочее место.

Технологическое оборудование – это средство технологического оснащения, в котором для выполнения определенной части технологического процесса размещают материалы или заготовки, средства воздействия на них, а также технологическую оснастку. К ним относят, например, литейные машины, прессы, станки, испытательные стенды и т.д.

Технологическая оснастка – это средство технологического оснащения, дополняющее технологическое оборудование для выполнения определенной части технологического процесса. К ним относятся режущий инструмент, приспособления, измерительные средства.

Технологическое оборудование совместно с технологической оснасткой, а в некоторых случаях и манипулятором, принято называть **технологической системой**. Понятием "технологическая система" подчеркивается, что результат технологического процесса зависит не только от оборудования, но и в не меньшей степени от приспособления, инструмента, заготовки.

Заготовкой называется предмет труда, из которого изменением формы, размеров, свойств поверхности или материала изготавливают деталь. Заготовку перед первой технологической операцией называют исходной заготовкой.

Рабочее место представляет собой элементарную единицу структуры предприятия, где размещены исполнители работы и обслуживаемое технологическое оборудование, подъемно-транспортные средства, технологическая оснастка и предметы труда.

По организационным, техническим и экономическим причинам технологический процесс делят на части, которые принято называть операциями.

Технологической операцией называется законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. Операция охватывает все действия оборудования и рабочих над одним или несколькими собираемыми объектами производства. При обработке на станках операция включает все действия рабочего, управляющего технологической системой, установку и снятие предмета труда, а также движения рабочих органов технологической системы. Содержание операций изменяется в широких пределах – от работы, выполняемой на отдельном станке или сборочной машине в обычном производстве, до работы, выполняемой на автоматической линии, представляющей собой комплекс технологического оборудования, связанного единой транспортной системой и имеющей единую систему управления в автоматизированном производстве. Число операций в технологическом процессе изменяется от одной (изготовление детали на прутковом автомате, изготовление корпусной детали на многооперационном станке) до десятков (изготовление турбинных лопаток, сложных корпусных деталей).

Формируют операцию, главным образом, по организационному принципу, так как она является основным элементом производственного планирования и учета. На операцию обычно разрабатывается вся плановая, учетная и технологическая документация.

В свою очередь, технологическая операция также состоит из ряда элементов: технологических и вспомогательных переходов, установка, позиций, рабочего хода.

Технологический переход – законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке.

Вспомогательный переход – это законченная часть технологической операции, состоящая из действий человека и(или) оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимы для выполнения технологического перехода (например, установка заготовки, смена инструмента и т.п.). Переход можно выполнять в один или несколько рабочих ходов.

Рабочий ход – это законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемая изменением формы, размеров, качества поверхности и свойств заготовки. При обработке заготовки со съемом слоя материала используют термин "припуск".

Припуском называют слой материала, удаляемый с поверхности заготовки в целях достижения заданных свойств изготавливаемой поверхности. Слой материала, удаляемый с одной поверхности готовой детали в результате выполнения всех технологических переходов, называется общим припуском на обработку этой поверхности.

Подготовка технологического оборудования и технологической оснастки к выполнению технологической операции называется **наладкой**. К наладке относятся установка приспособления, обрабатывающего инструмента, установление скоростей и подач, и т.д.

Подналадка – это дополнительная регулировка технологического оборудования и(или) оснастки в процессе работы для восстановления достигнутых при наладке значений параметров.

В некоторых случаях для выполнения части технологического процесса предмет труда вместе с приспособлением должны занимать одно или несколько последовательных положений. В связи с этим было введено понятие позиции.

Позиция – это фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей, или деталью совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операции.

Установ – часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемой заготовки или сборочной единицы. Например, при обработке вала на фрезерно-центровальном станке фрезерование торцев вала с двух сторон и их центрование выполняют последовательно за один установ заготовки. Подрезка торцев и их центрование могут быть выполнены, например, и на токарно-винторезном станке последовательно за два установка заготовки: сначала обрабатывают торец и зацентрируют с одной стороны вала, а потом, переустановив заготовку, делают то же самое с другой стороны.

На выполнение любого технологического процесса затрачивается определенное количество труда работника соответствующей квалификации. Для характеристики затрачиваемого труда пользуются такими понятиями, как трудоемкость, норма времени, норма выработки.

Трудоемкостью называется количество времени, затрачиваемое работающим при определенных организационно-технических условиях на выполнение технологического процесса или его части.

Трудоемкость измеряют в нормо-часах (человеко-часах). Понятие трудоемкости в равной степени относится как к изготовлению изделия в

целом, так и к отдельным частям технологического процесса (например, трудоемкость изготовления детали, трудоемкость операции). Различают трудоемкость фактическую, подсчитываемую после осуществления технологического процесса, и расчетную или нормированную, определяемую на стадии проектирования технологического процесса.

Для нормирования труда и планирования производственного процесса пользуются нормой времени или нормой выработки.

Нормой времени называется регламентированное время выполнения технологической операции в определенных организационно-технических условиях одним или несколькими исполнителями соответствующей квалификации. Норму времени измеряют в единицах времени с указанием квалификации работы, если операция выполняется при непосредственном участии рабочего (например: 10 мин, работа 5-го разряда).

Технически обоснованной нормой времени называют регламентированное время выполнения технологической операции в определенных организационно-технических условиях, наиболее благоприятных для данного производства. Технически обоснованную норму времени устанавливают в соответствии с эксплуатационными возможностями оборудования, инструментов и других средств производства при условии применения методов работы, соответствующих современным достижениям техники, передового производственного опыта.

В тех случаях, когда время выполнения операции мало (исчисляется долями минуты или секундами), целесообразно пользоваться нормой выработки, которая является величиной, обратной норме времени.

Нормой выработки называется регламентированное количество изделий, которое должно быть обработано или изготовлено в заданную единицу времени в определенных организационно-технических условиях одним или несколькими исполнителями соответствующей квалификации.

Норму выработки измеряют в штуках в единицу времени с указанием квалификации работы в случае непосредственного участия рабочего (например: 150 шт./мин, работа 4-го разряда).

Любой технологический процесс протекает во времени. Интервал календарного времени от начала до конца какой-либо периодически повторяющейся технологической операции независимо от числа одновременно изготавливаемых или ремонтируемых изделий называется **циклом технологической операции**.

Машиностроительное производство характеризуется объемом выпуска, программой выпуска продукции, тактом выпуска.

Объем выпуска изделий – это количество изделий одного наименования, типоразмера и исполнения, изготавливаемых или ремонтируемых предприятием в течение планируемого промежутка времени.

Перечень наименований изделий, подлежащих изготовлению или ремонту, с указанием объема выпуска и срока выполнения по каждому наименованию на планируемый период времени называется **программой выпуска изделий**.

Все изделия, изготовленные по конструкторской и технологической документации без ее изменения называются **серией изделия**.

Тактом выпуска называется интервал времени, через который периодически производится выпуск изделий или заготовок определенного наименования, типоразмера и исполнения.

Ритм выпуска – это количество изделий определенного наименования, типоразмера и исполнения, выпускаемых в единицу времени.

Производственной партией принято называть предметы труда одного наименования, поступающие в обработку в течение определенного интервала времени, при одном и том же подготовительно-заключительном времени на операцию.

В зависимости от потребностей изделия изготавливают в различных количествах. Одни изделия изготавливают на предприятии в одном экземпляре или нескольких штуках, другие – сотнями тысяч штук.

В зависимости от широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска изделий различают три типа производства: единичное, серийное и массовое.

Одной из характеристик производства является *коэффициент закрепления операций* ($k_{з.о.}$), представляющий собой отношение числа всех различных технологических операций, выполняемых в течение месяца, к числу рабочих мест.

Чем шире номенклатура выпускаемых изделий и меньше их количество, тем больше величина $k_{з.о.}$

Единичное производство характеризуется малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматривается. Изделия выпускаются широкой номенклатуры в относительно малых количествах, зачастую индивидуально, и либо совсем не повторяются, либо повторяются через неопределенные промежутки времени. Продукция единичного производства – машины, не имеющие широкого применения и изготавливаемые по индивидуальным заказам, предусматривающим выполнение специальных требований (опытные образцы машин в различных отраслях машиностроения, крупные гидротурбины, уникальные металлорежущие станки, прокатные станы и т.д.).

Серийное производство характеризуется изготовлением или ремонтом изделий периодически повторяющимися партиями.

Серийное производство делится на *мелкосерийное*, *среднесерийное*, *крупносерийное*. Условной границей между разновидностями серийного производства является величина коэффициента закрепления операций ($k_{3,0}$):

- для мелкосерийного производства $20 < k_{3,0} \leq 40$;
- для среднесерийного – $10 < k_{3,0} \leq 20$;
- для крупносерийного – $1 < k_{3,0} \leq 10$.

Массовое производство характеризуется небольшой номенклатурой, большим объемом выпуска изделий, непрерывным изготовлением или ремонтом изделий продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция. Для массового производства $k_{3,0} = 1$.

Различают поточный и непоточный вид организации производственного процесса.

Поточный вид организации производственного процесса характеризуется расположением средств технологического оснащения в последовательности выполнения операций технологического процесса и определенным интервалом выпуска изделий. Этот вид организации производственного процесса характерен для массового и крупносерийного производств.

При **непоточном виде** организации производственного процесса предмет труда находится в движении по операциям с различной продолжительностью. Этот вид организации производственного процесса характерен для единичного и мелкосерийного производств.

Для непоточного вида организации производственного процесса характерны отсутствие закрепления операций за конкретными рабочими местами, разная длительность операций, стремление на каждом рабочем месте осуществить максимальную концентрацию технологических переходов с целью уменьшения числа операций.

С целью приблизить производственный процесс к поточному виду в условиях мелкосерийного производства применяют групповую организацию, которая характеризуется совместным изготовлением или ремонтом групп изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

Производство любой машиностроительной продукции невозможно без его технической подготовки, которая включает:

1) конструкторскую подготовку производства (разработку конструкции изделия и создание его сборочных чертежей, рабочих чертежей

деталей, запускаемых в производство, с оформлением соответствующих спецификаций и другой конструкторской документации);

2) технологическую подготовку производства (ТПП) – совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства (последняя определяется наличием на предприятии полных комплектов конструкторской и технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для осуществления заданного объема выпуска продукции с установленными технико-экономическими показателями);

3) календарное планирование производственного процесса изготовления изделия в установленные сроки при заданном объеме выпуска и затратах.

Организация и управление ТПП регламентируются государственными стандартами "Единой системы технологической подготовки производства" (ЕСТПП).

Основной целью ТПП является обеспечение высокой эффективности производства изделий требуемых качества и количества в установленные сроки и в соответствии с заданными технико-экономическими показателями, устанавливающими технический уровень изделия и минимальные трудовые и материальные затраты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы составные части изделия?
2. Чем отличается технологический процесс от производственного процесса?
3. Что входит в состав технологической оснастки?
4. Что понимается под технологической системой?
5. По какому принципу формируется технологическая операция?
6. В чем разница между технологическим переходом, рабочим ходом и вспомогательным переходом?
7. В чем разница между наладкой и подналадкой?
8. Что такое трудоемкость?
9. Когда применяются норма времени и норма выработки?
10. В чем разница между программой выпуска изделий и объемом выпуска изделий?
11. Чем отличается такт выпуска от ритма выпуска?
12. Какие бывают типы производства и в чем их различие?

Глава 1.2

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЕ ИЗДЕЛИЕ КАК ОБЪЕКТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Каждое изделие (машина, механизм, инструмент и др.) создается для удовлетворения соответствующих потребностей человека и представляет собой техническую систему, описываемую совокупностью элементов, отношение к которым зависит от того, с каких позиций рассматривать изделие.

Изделие можно рассматривать как объект эксплуатации или производства. В первом случае оно представляется совокупностью функциональных элементов, определяемых служебным назначением изделия. Например, конструкция технологической обрабатывающей системы – это техническая система, состоящая из базовой детали (станины), инструментальной бабки, бабки изделия, приспособления, других устройств и отдельных деталей, несущих соответствующие функциональные нагрузки.

Если эту же технологическую систему рассматривать как объект производства, то ее конструкция представляет собой техническую систему в виде совокупности сборочных единиц и деталей, обезличенных с точки зрения их функционального назначения. Например, рабочему при изготовлении детали на станке безразлично, в состав какой машины она входит и каково ее служебное назначение; рабочему при изготовлении нужны только чертеж детали и технические требования на нее.

Из этих двух представлений первичным является **изделие как объект эксплуатации**, так как оно создается для удовлетворения соответствующих потребностей человека; вторичным является **изделие как объект производства**.

1.2.1. СЛУЖЕБНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЯ

Создание изделия начинается с определения задачи, для решения которой оно создается, и получившей название служебного назначения.

Формулировка служебного назначения изделия включает описание процесса, для которого создается изделие, и условия, в которых оно будет работать. Например, при формулировании назначения станка следует указать описание процесса обработки (метод обработки, режущий инструмент, обрабатываемый материал, режимы резания, требуемое качество поверхности, производительность обработки и другие), а также условия,

в которых будет работать станок. Так, например, станки, работающие в обычной или агрессивной средах, должны быть разного исполнения.

Если в качестве изделия выступает автомобиль, то в формулировке его служебного назначения должны найти отражение характер перевозимого груза, его масса, объем, расстояние и скорость перевозки, состояние дорог, климатические условия, требования к внешнему виду и др. Все перечисленное влияет на конструкцию автомобиля (например, если автомобиль предназначен для перевозки людей, то его кузов будет отличаться от кузова самосвала).

В формулировке служебного назначения изделия должны найти отражение качественные и количественные характеристики процесса, в котором будет участвовать изделие, а также условия протекания процесса.

Опыт машиностроения показывает, что каждая ошибка, допущенная при выявлении и уточнении служебного назначения изделия, приводит не только к созданию недостаточно качественной машины, но и вызывает лишние затраты труда на ее изготовление и эксплуатацию, а также удлинение сроков ее освоения. Нередко недостаточно глубокое изучение и выявление служебного назначения машины порождает излишне жесткие, экономически неоправданные требования к эксплуатационным показателям машины.

Из изложенного следует, что разработка служебного назначения изделия является важным и ответственным этапом в его создании.

1.2.2. ИЗДЕЛИЕ КАК СОВОКУПНОСТЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

Изделие представляет собой техническую систему в виде совокупности элементов, наименьшим из которых является деталь.

Свое служебное назначение изделие выполняет посредством осуществления относительного движения или положения определенных поверхностей или сочетания поверхностей его деталей. Такие поверхности условились называть *исполнительными поверхностями*.

Для осуществления заданного закона относительного движения или положения исполнительных поверхностей необходимо в изделии наличие кинематических и размерных связей, которые реализуются с помощью соответствующих деталей.

Деталь представляет собой пространственное тело, очерченное совокупностью поверхностей, выполняющих соответствующие функции; классификация поверхностей приведена на рис. 1.2.1. Согласно этой

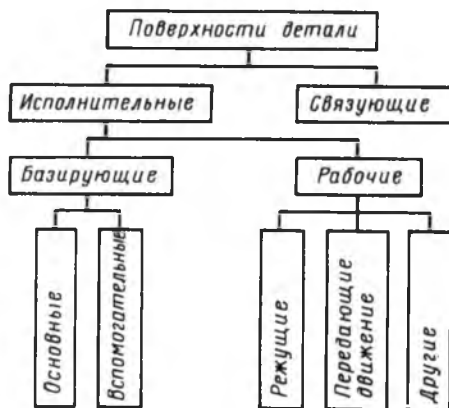


Рис. 1.2.1. Классификация поверхностей детали

классификации, все поверхности детали делятся на исполнительные и связующие. Под исполнительными поверхностями понимают поверхности, с помощью которых деталь выполняет свое назначение в машине или механизме. В свою очередь исполнительные поверхности делятся на базирующие и рабочие.

С помощью рабочих поверхностей деталь выполняет рабочие функции, такие как передача движения, резание материала, силовое нагружение, герметизация и др.; с помощью базирующих поверхностей определяется положение детали в машине.

Поверхности детали, посредством которых определяется ее положение в машине, принято называть *основными базами*, а поверхности, по которым на ней базируются другие детали, называют *вспомогательными базами*.

Одновременно деталь имеет связующие поверхности, при помощи которых исполнительные поверхности детали объединяются в пространственное тело и деталь приобретает соответствующие конструктивные формы. Связи между поверхностями детали осуществляются посредством ее материала. Рассмотрим в качестве примера зубчатое колесо. На рис. 1.2.2 показаны его исполнительные поверхности. В соответствии со служебным назначением зубчатое колесо имеет рабочие поверхности в виде участков эвольвентной поверхности на боковых поверхностях зубьев, с помощью которых передается крутящий момент. Поверхности в виде отверстия, торца и боковой поверхности шпоночного паза являются

основными базами зубчатого колеса, которыми (рис. 1.2.3) оно базируется на валу; остальные поверхности относятся к связующим поверхностям. Таким образом, зубчатое колесо можно представить как совокупность участков эвольвентной поверхности, цилиндрического отверстия, плоской поверхности (торец) и боковой поверхности шпоночного паза (см. рис. 1.2.2.). Соединив эти поверхности с помощью связующих поверхностей, получим зубчатое колесо.

Задача размерных связей в изделии состоит в обеспечении требуемого относительного положения исполнительных поверхностей, а задача кинематических связей – в обеспечении заданного закона относительного движения исполнительных поверхностей.

Кинематические связи материализуются с помощью механических, электрических, гидравлических, пневматических и других средств. В соответствии со средствами материализации кинематические связи изображают в виде кинематических, электрических, гидравлических и пневматических схем.

При механическом исполнении кинематических связей в качестве звеньев кинематических цепей выступают зубчатые колеса, пары винт–гайка, муфты, кулачки, рычаги и т.п. Посредством их перемещений и поворотов движение от привода передается деталям, несущим рабочие поверхности.

Если кинематические связи реализуются гидравлическим или пневматическим способом, то кинематическими звеньями являются рабочая среда и носители рабочей среды: трубопроводы, клапаны, элементы, передающие движение (штоки, поршни, цилиндры). Таким образом, для материализации кинематических связей изделие содержит соответствующие детали, выполняющие роль кинематических звеньев.

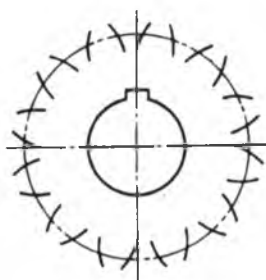


Рис. 1.2.2. Исполнительные поверхности зубчатого колеса

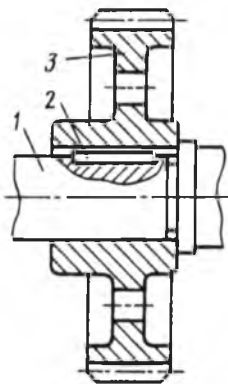


Рис. 1.2.3. Сборочная единица (зубчатое колесо):
1 – вал; 2 – шпонка;
3 – зубчатое колесо

Для того чтобы детали, несущие исполнительные поверхности машины и ее механизмов, а также и все другие, выполняющие функции ее кинематических цепей, двигались в соответствии с требуемым законом их относительного движения и занимали одни относительно других требуемые положения, их соединяют при помощи различного рода других деталей в виде корпусов, станин, коробок, кронштейнов и т.д., которые назовем *базирующими деталями*.

Изделие, как уже отмечалось, представляет собой техническую систему в виде совокупности элементов.

Если изделие рассматривать как объект эксплуатации, то составляющие его элементы группируются в различного рода агрегаты, механизмы, устройства, предназначенные выполнять соответствующие функции, связанные с осуществлением его служебного назначения.

Условимся эти составные части изделия называть *функциональными модулями*. По своему назначению их можно разделить на две группы:

- модули функциональные технологические (МФТ);
- модули функциональные обслуживающие (МФО).

Под МФТ будем понимать модуль, с помощью которого изделие как объект эксплуатации выполняет непосредственно свое служебное назначение (например, у автомобиля МФТ являются кузов для размещения перевозимого груза, двигатель, с помощью которого движется автомобиль и др.).

У обрабатывающей технологической системы к МФТ относятся станок, стол или приспособление для установки заготовки, инструментальная наладка, в некоторых случаях контрольно-измерительное устройство. Эти модули непосредственно участвуют в выполнении служебного назначения технологической системы.

В свою очередь, для того чтобы МФТ могли выполнять свои функции, необходимы модули функциональные обслуживающие (например, для осуществления обрабатывающей технологической системой заданного закона относительного движения заготовки и инструмента необходимы такие МФО, как коробка передач, коробка подач).

Если технологическая система предназначена выполнять дополнительные функции (например, подачу смазочно-охлаждающей жидкости в зону обработки), то она будет содержать и соответствующие функциональные модули.

Перечисленный набор функциональных модулей, скомпонованных в конструкцию, позволяет обрабатывающей технологической системе выполнять свое служебное назначение. Если рассмотреть другой пример,

грузовой автомобиль, то он отличается от обрабатывающей технологической системы составом МФТ. Пусть автомобиль является самосвалом, где для выполнения своего служебного назначения (транспортировать груз), он должен иметь такие МФТ, как кузов, движитель, кабина водителя, механизм наклона кузова, рулевое управление. Все остальные его агрегаты: двигатель, рама, трансмиссия и др. — относятся к МФО.

Для каждого изделия характерны вполне определенные МФТ — именно ими изделие одного назначения отличается от изделия другого назначения. Поэтому МФТ определенного класса машин по служебному назначению отличаются разнообразием лишь по характеристикам и конструктивному оформлению, а рост разнообразия МФТ по назначению связан, главным образом, с разнообразием служебного назначения изделий.

В отличие от МФТ, одни и те же МФО (например, подшипниковые узлы, зубчатые передачи, приводы) могут применяться в изделиях самого разного назначения,

Описание изделий по составу содержащихся в них МФТ имеет большое научное значение, так как открывает путь к построению их классификации с единых позиций с последующей типизацией, унификацией модулей и создания производств, специализированных под их изготовление.

Практика машиностроения показывает примеры создания подобного рода производств, например, производства по выпуску электродвигателей, гидроприводов, подшипников, редукторов и др.

Однако пришло время системного подхода в организации таких производств, реализация которых должна начинаться с анализа состава функциональных модулей изделий различного назначения. Это позволит осуществить их классификацию, широкую типизацию и унификацию не по отдельным видам изделий или отраслям, а на уровне всего машиностроения.

1.2.3. КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЯ

Для успешного выполнения служебного назначения изделие должно обладать соответствующим качеством.

Качество как философская категория трактуется как объективная и всеобщая характеристика объектов, обнаруживающаяся в совокупности их свойств.

В свою очередь, свойство выражает такую сторону предмета, которая обуславливает его различие или общность с другими предметами и обнаруживается в его отношении к ним.

Когда речь идет о качестве изделия, то следует понимать не потребительские свойства изделия, так как они входят в состав задачи (служебного назначения), решаемой конструктором при проектировании изделия, а те свойства, с помощью которых они достигаются конструкцией изделия.

В этом случае изделие рассматривается как некоторая техническая система, представляющая собой совокупность функциональных модулей, объединенных в определенную конструкцию, и обладающая необходимыми свойствами. Отсюда под качеством изделия будем понимать совокупность свойств конструкции изделия, обуславливающих ее способность выполнять служебное назначение.

К свойствам, характеризующим качество конструкции изделия как объекта эксплуатации, относятся ее геометрическая точность, прочность, жесткость, износостойкость, виброустойчивость, теплостойкость и др.

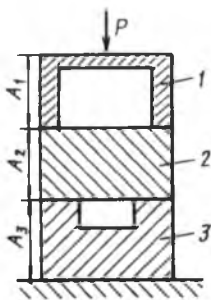
Каждое из перечисленных свойств описывается качественными и количественными показателями, объединенными в систему технических требований.

Следует различать *показатели качества конструкции изделия и его элементов*. К первым относятся те, которые непосредственно влияют на выполнение изделием служебного назначения; ко вторым – показатели, которые формируют выходные показатели изделия.

Влияние качества элементов конструкции изделия на выходные показатели его качества осуществляется через соответствующие связи (например, на выходную точность конструкции изделия влияют размерные связи деталей, на прочность конструкции – прочность деталей, на жесткость конструкции – жесткости деталей).

Прочность конструкции из трех деталей 1 – 3 (рис. 1.2.4) определяется минимальной прочностью одной из трех деталей: точность размера A определяется точностью размеров A_1 , A_2 , A_3 .

Если говорить о жесткости этой конструкции, где под жесткостью j понимается отношение силы P к перемещению y , то величина жесткости j конструкции будет определяться из равенства



$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j_1} + \frac{1}{j_2} + \frac{1}{j_3},$$

Рис. 1.2.4. Конструкция из трех деталей 1 – 3

где j_i – жесткость i -й детали.

Сопоставление влияния прочности, точности и жесткости деталей конструкции на выходные показатели показывает их принципиальное различие. В первом случае прочность конструкции определяется минимальной прочностью одной из деталей, находящихся под воздействием силы P , в то время как точность и жесткость конструкции изделия зависят от точности и жесткости всех деталей.

В результате изготовления изделия значения его качественных показателей отличаются от заданных, вследствие чего на их отклонения оказывают влияние допуски.

Установление оптимальных на данном уровне развития техники допусков на отклонение значений каждого из показателей качества представляет одну из наиболее ответственных и сложных задач машиностроения. С одной стороны, с уменьшением допусков на показатели качества изделие будет работать лучше, однако это повлечет за собой увеличение затрат на его изготовление и повысит расходы на эксплуатацию из-за необходимости более частых ремонтов для восстановления требуемого качества изделия.

Таким образом, допуски на все показатели качества изделия должны устанавливаться на основе технико-экономических расчетов, обеспечивающих достижение наименьших затрат общественно необходимого труда на решение задач, для выполнения которых создается данное изделие, а также с учетом конкуренции.

Допуски на все показатели качества изделия, установленные исходя из его служебного назначения, делятся обычно на две части: первая часть — для компенсации погрешностей изготовления изделия; вторая — для компенсации погрешностей (например, вследствие износа), возникающих в процессе эксплуатации изделия.

Здесь в противоречие вступают интересы потребителей и производителей изделий, заключающиеся в том, что изготовителю выгоднее иметь больше допуск на изготовление (легче и дешевле достичь заданного качества), а потребителю выгоднее иметь больший допуск на эксплуатацию (дешевле эксплуатация). Это противоречие должно разрешаться на основе интересов общества, т.е. достижения наименьших затрат общественного труда. Неправильное решение этой задачи может привести к тому, что новое изделие через короткое время эксплуатации потеряет возможность выполнять свое служебное назначение, так как завод-изготовитель использовал большую долю допусков на изготовление изделия и почти ничего не оставил на его износ.

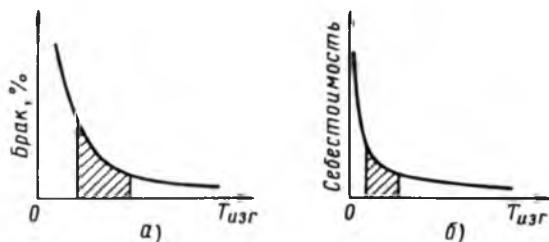


Рис. 1.2.5. Зависимости брака и себестоимости изделия от допуска (заштрихованные участки соответствуют рациональным допускам на изготовление)

Опыт машиностроения показывает, что вследствие недостаточности знаний для исчерпывающего объяснения явлений, происходящих при работе изделий, и недостатков инженерных методов расчета приходится ужесточать допуски. В то же время безграничное увеличение допуска на изготовление, как следует из рис. 1.2.5, нецелесообразно. Действительно, поскольку кривые асимптотически приближаются к осям, то при каком-то значении допуска на изготовление дальнейшее его увеличение не приведет практически к снижению себестоимости изготовления изделий и не снизит брак. Зависимости "себестоимость эксплуатации – допуск на эксплуатацию" носят аналогичный характер. Задача конструктора состоит в делении допуска на две рациональные части таким образом, чтобы получить наименьшие затраты общественно полезного труда.

Рассмотрим связи выходных показателей качества конструкции изделия со служебным назначением на примере шестеренного насоса трактора (рис. 1.2.6).

Шестеренный насос предназначен для подачи смазочного материала к трущимся поверхностям деталей трактора под давлением 0,6 МПа. Насос должен обеспечить подачу масла не менее 30 л/мин при частоте вращения зубчатых колес 39 с^{-1} .

Как следует из служебного назначения шестеренного насоса, он должен обеспечивать заданную производительность, быть долговечным, без превышения уровня шума заданных границ и др.

Проанализируем достаточность и правильность заданных технических требований (являющихся выходными показателями качества) насоса, обусловленных его служебным назначением. К таким выходным по-

казателям относятся значения радиального, бокового, торцового зазоров с указанными на них допусками. Фактическая подача масла насосом

$$Q_{\phi} = 60 Q_T n - Q_y - Q_{\text{вс}},$$

где Q_T – теоретическая подача масла насосом за один оборот зубчатых колес, л/мин; n – частота вращения зубчатых колес, с^{-1} ; Q_y – утечка масла, л/мин; $Q_{\text{вс}}$ – потери при всасывании, л/мин.

При нагнетании возможны утечки масла:

$$Q_y = Q_{y_p} + Q_{y_z} + Q_{y_t},$$

где Q_{y_p} – утечка через радиальные зазоры между зубьями и корпусом; Q_{y_z} – утечка, обусловленная неплотностью контакта зубьев; Q_{y_t} – утечка через торцовые зазоры между корпусом и зубчатыми колесами. Числовые значения отклонений и утечек приведены в табл. 1.2.1.

Как следует из табл. 1.2.1, нормы допустимых утечек и потерь при всасывании позволяют определить величины допусков на параметры, от которых зависят утечки и потери. В частности, исходя из установленной нормы утечки масла Q_y , находят нормы утечек Q_{y_p} , Q_{y_z} , Q_{y_t} , а

исходя из них определяют наибольший допустимый радиальный зазор, боковой зазор между зубьями, торцовый зазор. Устанавливая наименьшие допустимые зазоры, следует учитывать условия трения зубчатых колес о корпус и возможность заклинивания их при нагреве во время работы.

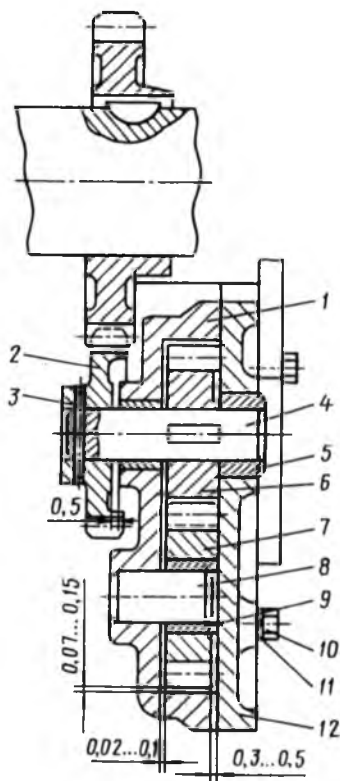


Рис. 1.2.6. Общий вид шестеренного насоса трактора:

- 1 – корпус; 2 – ведомое зубчатое колесо; 3 – штифт; 4 – валик; 5, 9 – втулка; 6, 7 – зубчатое колесо; 8 – ось; 10 – винт; 11 – шайба; 12 – крышка

Таблица 1.2.1

Причина утечки масла	Верхнее предельное отклонение зазора, мм	Возможная утечка масла, л/мин
Радиальные зазоры	0,15	0,44
Боковой зазор между зубьями зубчатых колес	0,45	4,49
Торцовый зазор между зубчатыми колесами и корпусом	0,12	1,8
Всего	—	6,73

К другим характеристикам служебного назначения насоса относятся долговечность зубчатой пары, бесшумность работы насоса.

Долговечность зубчатой передачи зависит не только от материала зубчатых колес, но и от величины и расположения пятна контакта зубьев колес, от которого зависят величины удельных нагрузок, воспринимаемых зубьями, а следовательно, и их долговечность. Таким образом, пятно контакта также входит в состав выходных показателей конструкции насоса.

В свою очередь, значения характеристик пятна контакта, его расположение являются функцией относительного положения зубчатых колес, одним из параметров относительного положения которых является величина бокового зазора (таким образом, боковой зазор тоже является выходным показателем точности конструкции насоса, влияющим на его долговечность).

Другим требованием служебного назначения насоса является допустимый уровень шума: уровень звукового давления при работе насоса во время работы не должен превышать 85 дБ. Уровень шума работы насоса во многом зависит от легкости и плавности работы зубчатой пары, что во многом определяется величиной бокового зазора.

Итак, из изложенного видно, что *радиальные зазоры, боковой зазор между зубьями зубчатых колес, торцовый зазор между зубчатыми колесами и корпусом являются выходными показателями качества точности конструкции насоса*, определяющими его способность выполнять служебное назначение.

В общем случае каждый из перечисленных выходных показателей качества применительно к тому или иному типу изделия конкретизирует-

ся в виде целой системы дополнительных качественных и количественных показателей, характеризующих особенности, которыми должны обладать конструкции изделий данного типа, предназначенные для выполнения заданного служебного назначения.

Одними из важнейших показателей качества, оказывающих большое влияние на трудоемкость изготовления изделия, являются геометрическая точность и качество поверхностного слоя детали.

1.2.3.1. Геометрическая точность детали и изделия

В общем случае под точностью понимается степень приближения фактического значения параметра к заданному значению.

Между геометрической точностью изделия и выполнением им служебного назначения имеют место качественные и количественные связи. Рассмотрим их на конкретных примерах.

Пример 1. Кулачковая пара (рис. 1.2.7). С ее помощью заготовка подается в рабочую зону станка-автомата в заданный момент времени. В соответствии с этой задачей определяется необходимый профиль кулачка 1, обеспечивающий при равномерном вращении требуемую закономерность возвратно-поступательного движения толкателя 2. Вследствие отклонения фактического профиля кулачка от заданного, наличия зазора между осью и отверстием в кулачке 1, а также смещения центра отверстия кулачка 1 относительно заданного положения, фактическая траектория движения толкателя 2 будет отличаться от теоретической. В итоге заготовка будет подана в другую точку рабочей зоны из-за опоздания или опережения. Это может вызвать или поломку станка-автомата, так как поступающая заготовка может столкнуться с предыдущей, или потерю производительности вследствие запаздывания поступления заготовки.

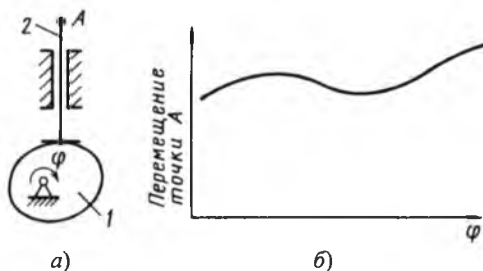


Рис. 1.2.7. Влияние погрешности кулачка на перемещение толкателя:

а – кулачковая пара: 1 – кулачок; 2 – толкатель; б – график перемещения точки А

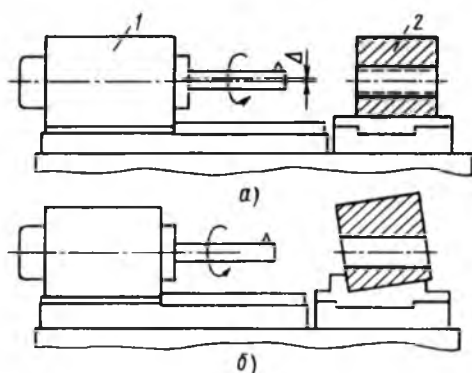


Рис. 1.2.8. Схема растачивания отверстия:

а – при несовпадении осей оправки и шпинделя; *б* – в результате погрешности установки заготовки; 1 – шпиндельная бабка; 2 – заготовка (штриховой линией показано заданное отверстие; сплошной линией – отверстие, полученное после обработки); Δ – несовпадение осей шпинделя и расточной оправки

Пример 2. Расточной станок. При растачивании отверстия в заготовке на расточном станке требуется обеспечить заданную точность диаметра, формы отверстия и положения оси отверстия (рис. 1.2.8). Из-за несовпадения оси оправки с осью шпинделя (рис. 1.2.8, *а*) возникает погрешность диаметра, из-за погрешности положения установочной базы приспособления (рис. 1.2.8, *б*) возникает отклонение оси обрабатываемого отверстия от заданного положения.

Геометрическая точность изделия есть функция геометрической точности его деталей.

Геометрическая точность детали. Под геометрической точностью детали понимается степень приближения реальной детали к ее геометрическому прототипу. Точность детали определяется измерением ее погрешности (под погрешностью детали понимается степень отличия реальной детали от ее геометрического прототипа).

Оценка точности детали осуществляется с помощью ряда показателей. Для оценки погрешности надо сопоставить реальный контур детали с контуром ее прототипа. Для этого необходимо относительно контура прототипа записать измеренный контур реальной детали. Если деталь больших размеров, то обеспечить это физически затруднительно из-за потребности в большой площади. Кроме того, при высоких требованиях

к точности потребуются дополнительно увеличить размеры контура, что приведет к еще большим размерам. При расположении контура детали относительно контура прототипа возникает многовариантность решения этой задачи, а отсюда и неоднозначность в оценке погрешности.

В итоге пошли по пути оценки точности детали с помощью группы показателей точности. Поскольку деталь представляет собой совокупность элементарных поверхностей, то условились оценивать точность детали через точность ее поверхностей и их относительного положения.

Точность поверхности определяется точностью ее размеров и геометрической формы.

Размер понимается как расстояние между двумя небольшими участками двух или одной поверхности, поэтому практически в подавляющем большинстве случаев безразлично, от которой из двух поверхностей или от какой из выбранных частей одной поверхности до другой производится измерение расстояния. В соответствии с этим размер принято изображать двусторонней стрелкой, соединяющей участки измеряемых поверхностей или одной поверхности.

Точность геометрической формы поверхности описывается с помощью трех показателей точности: макрогеометрии, волнистости и микрогеометрии:

1) под макрогеометрическими отклонениями понимают отклонения реальной поверхности от правильной геометрической формы в пределах габаритных размеров этой поверхности (например, отклонение плоской поверхности от плоскостности, поверхности кругового цилиндра, конуса, шара от их геометрических прототипов);

2) под волнистостью понимают периодические неровности поверхности, встречающиеся на участках протяженностью от 1 до 10 мм;

3) под микрогеометрическими отклонениями (микронеровностями) понимают отклонения реальной поверхности в пределах небольших ее участков, обычно размером 1 мм^2 (микрогеометрические отклонения называют шероховатостью поверхности).

В качестве примера на рис. 1.2.9 показаны отклонения сечения цилиндрической поверхности детали:

- отклонение диаметрального размера $\Delta d = D - d$ (рис. 1.2.9, а);
- макрогеометрическое отклонение, когда вместо окружности профиль реальной поверхности является овалом (рис. 1.2.9, б);
- волнистость (рис. 1.2.9, в);
- шероховатость (рис. 1.2.9, г).

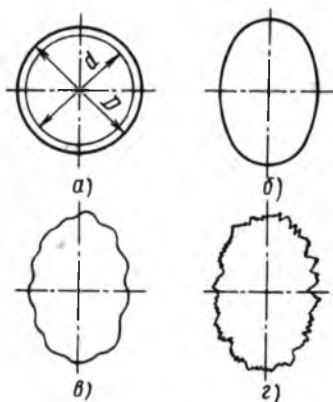


Рис. 1.2.9. Погрешности детали:
 a – погрешность диаметра;
 $б$ – погрешность формы; $в$ – волнистость;
 $г$ – шероховатость

Точность относительного положения поверхностей детали в плоскости принято оценивать с помощью расстояния и поворота (рис. 1.2.10), где положение плоскости A относи-

тельно плоскости B оценивается с помощью размера a и угла поворота α .

Недостаток дифференциального метода оценки точности детали заключается в необходимости установления связей между всеми показателями точности.

Между показателями точности детали существуют качественные и количественные взаимосвязи. Пока можно говорить только о качественных связях, так как функциональных зависимостей, существующих между перечисленными показателями точности детали, до сих пор в общем виде не установлено. Не зная микроотклонений, трудно говорить о точности формы (в смысле макрогеометрических отклонений), так как при измерении макроотклонений в измеренную величину в качестве одного из слагаемых войдут микронеровности, если не будет предпринято специальных мер для исключения их влияния (например, при измерении погрешности макроотклонений от вершины гребешков микронеровностей используют измерительный инструмент с наконечниками, перекрывающими несколько гребешков, и пренебрегают при этом величиной смятия гребешков в процессе измерения).

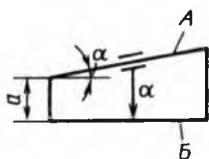


Рис. 1.2.10. Показатели точности относительного положения поверхностей A и B детали

Не зная макроотклонений поверхности, также трудно судить об отклонениях поворота одной по-

верхности относительно другой, так как при измерении этого отклонения макроотклонения будут влиять на величину измеренного отклонения. При некоторых же формах макроотклонений поверхности практически не представляется возможности даже измерить отклонение поворота одной поверхности относительно другой без введения особых условий и специальных методов измерения (например, относительно выпуклой поверхности *A* (рис. 1.2.11, *a*) нельзя определить, насколько она отклоняется от параллельности к поверхности *B*, если даже последняя представляет собой плоскость).

Если отклонение от параллельности измерять, например, с помощью уровня, то при его непосредственной установке на отдельные участки выпуклой поверхности *A* остается неизвестным, какую величину его отклонения и на каком участке измеряемой поверхности считать за отклонение от параллельности.

Только установив по краям измеряемой поверхности детали две калиброванные плитки *1*, *2* и наложив уровень на поставленную на них линейку *3*, можно условно говорить об отклонении этой поверхности от параллельности второй поверхности, посредством которой деталь установлена на контрольной плите (рис. 1.2.11, *б*).

Трудно также говорить о точности расстояния между двумя поверхностями, так как на измеренное отклонение оказывают влияние отклонения поворота поверхности, макро- и микроотклонения.

Из изложенного следует:

1) измерение точности детали должно начинаться с измерения микронеровностей, затем должны измеряться макронеровности, далее отклонения поворота поверхности и, наконец, точность расстояния или размера;

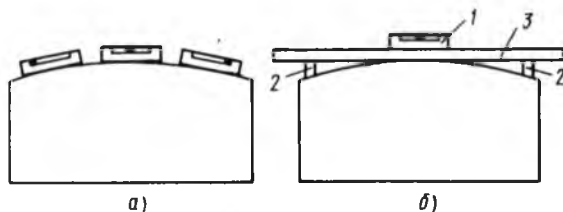


Рис. 1.2.11. Влияние погрешности формы поверхности на отклонение от параллельности:

a – влияние на измерение отклонения от параллельности положения уровня;

б – измерение отклонения от параллельности с помощью линейки;

1 – уровень, *2* – калиброванные плитки; *3* – линейка

2) допуски на расстояния и размеры поверхностей детали должны быть больше допусков на величину отклонений поворота поверхностей, которые, в свою очередь, должны быть больше допусков на макрогеометрические отклонения, а последние больше допусков на микрогеометрические отклонения.

После изготовления деталь подлежит контролю, по результатам которого устанавливается соответствие ее геометрических погрешностей допускам.

Геометрическая точность конструкции изделия. Изделие выполняет свое служебное назначение посредством относительного движения или положения исполнительных поверхностей, поэтому под геометрической точностью изделия понимается степень соответствия фактической траектории относительного движения или положения исполнительных поверхностей заданному движению или положению, которые являются функцией точности деталей изделия.

Рассмотренные выше показатели, характеризующие точность детали, целиком используются и для характеристики точности изделия. Различие заключается только в том, что у детали все показатели точности относятся к поверхностям только данной детали, у изделия же они относятся к исполнительным поверхностям, принадлежащим различным деталям изделия.

Если точность деталей влияет на точность относительного движения или положения исполнительных поверхностей изделия, то геометрическая точность конструкции всего изделия или его механизмов влияет на качество выполнения им служебного назначения.

Исходя из изложенного выше, точность изделия характеризуется следующими основными показателями:

- 1) точностью относительного движения исполнительных поверхностей изделия;
- 2) точностью расстояний между исполнительными поверхностями или заменяющими их сочетаниями поверхностей и размеров;
- 3) точностью относительных поворотов исполнительных поверхностей;
- 4) точностью геометрических форм исполнительных поверхностей;
- 5) шероховатостью исполнительных поверхностей.

1.2.3.2. Качество поверхностного слоя детали

Другим важнейшим показателем качества детали, обеспечивающим выполнение ею служебного назначения, и выполнение которого связано с существенными затратами при изготовлении деталей, является качество поверхностного слоя.

Под поверхностным слоем детали понимается как сама поверхность, полученная в результате обработки, так и слой материала, непосредственно прилегающий к ней.

Детали работают в разнообразных условиях. В зависимости от назначения изделия и условий его работы детали могут подвергаться коррозионному воздействию, воспринимать большие нагрузки, испытывать контактное взаимодействие с другими деталями и т.д. Поэтому детали должны обладать контактной жесткостью, сопротивлением усталости, коррозионной стойкостью, износостойкостью и другими свойствами, во многом зависящими от качества поверхностного слоя. Например:

- скорость и характер изнашивания детали в значительной степени зависят от высоты неровностей поверхности, их направления, твердости поверхностного слоя и др.;

- прочность неподвижных посадок сопрягаемых деталей непосредственно связана с шероховатостью сопрягаемых поверхностей;

- сопротивление усталости деталей зависит от шероховатости их поверхностей, наличия отдельных повреждений, способствующих концентрации напряжений и т.д.

В связи с изложенным наружный слой детали, как правило, по своим физико-химическим свойствам отличается от свойств основного материала детали. Он формируется при изготовлении и эксплуатации и по глубине может составлять от десятых долей микрометра до нескольких миллиметров. Поверхностный слой характеризуется геометрическими характеристиками и физико-химическими свойствами (рис. 1.2.12).

Под геометрическими характеристиками поверхностного слоя понимают макроотклонение, волнистость, шероховатость и субшероховатость [8].

Макроотклонение *l* поверхности – это неровность высотой $10^{-2} \dots 10^3$ мкм на всей ее длине или ширине.

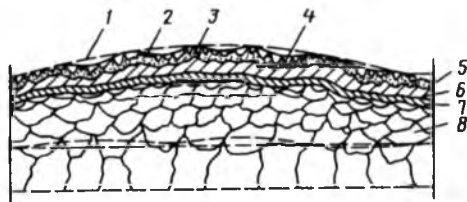


Рис. 1.2.12. Схема поверхностного слоя детали:

- 1 – макроотклонение; 2 – волнистость; 3 – шероховатость; 4 – субшероховатость;
- 5 – адсорбированная зона; 6 – зона оксидов; 7 – границная зона материала;
- 8 – зона материала с измененными физико-химическими свойствами

Волнистость 2 поверхности – совокупность неровностей высотой примерно $10^{-2} \dots 10^3$ мкм с шагом большим, чем базовая длина l , используемая для ее измерения.

Под *шероховатостью 3* поверхности понимают совокупность неровностей высотой $10^{-2} \dots 10^3$ мкм с шагом меньшим, чем базовая длина, используемая для ее измерения.

Субшероховатость 4 – это субмикронеровности высотой примерно $10^{-3} \dots 10^{-2}$ мкм, накладываемые на шероховатость поверхности.

Верхняя зона 5 толщиной около $10 \dots 100$ мкм – это адсорбированный из окружающей среды слой молекул и атомов органических и неорганических веществ (например, воды, CO_2 , растворителей, промывочных жидкостей).

Промежуточная зона 6 толщиной примерно $10^{-3} \dots 1$ мкм представляет собой продукты химического воздействия металла с окружающей средой (обычно оксидов).

Граничная зона 7 имеет толщину, равную нескольким межатомным расстояниям со значительно измененными кристаллической и электронной структурой и химическим составом.

Зона 8 имеет толщину примерно $10^{-4} \dots 10$ мм с измененными физико-химическими свойствами по сравнению со свойствами основного материала, где под физико-химическими свойствами поверхностного слоя понимают остаточные напряжения, наклеп и структуру.

Поверхностные остаточные напряжения оцениваются макронапряжениями 1-го рода, макронапряжениями 2-го рода и статическими искажениями решетки (напряжения 3-го рода).

Поверхностные напряжения или наклеп оцениваются степенью деформирования, глубиной наклепа, степенью наклепа, градиентом наклепа и макродеформацией решетки.

Структура поверхностного слоя оценивается: размером зерна; плотностью дислокаций; концентрацией вакансий; размером блоков; углом разориентации блоков; размером областей когерентного рассеяния; среднеквадратическим смещением атомов, вызванным статическими искажениями решетки; среднеквадратическим смещением атомов, вызванным их тепловыми колебаниями.

Оценка геометрических характеристик и физико-химических свойств может быть непараметрической и параметрической.

Непараметрическая оценка заключается в графическом изображении макроотклонения, волнистости, шероховатости, субшероховатости, структуры, распределения остаточных напряжений и наклепа поверхностного слоя для визуального сравнения. В частности, для непараметрической оценки шероховатости используют профилограммы, кривые опор-

ных длин профиля, кривые распределения ординат или вершин профиля, спектрограммы профиля, топограммы и т.п.

При *параметрической оценке* характеристик поверхностного слоя деталей машин используются приведенные ниже параметры.

Макроотклонение (отклонение формы) (рис. 1.2.13) характеризуется:

- максимальным макроотклонением $H_{\max}$, мкм;
- высотой сглаживания макроотклонения (расстояние от средней линии профиля до огибающей) H_p , мкм.

Отклонение формы нормируется значением допуска формы поверхности и рекомендована ее взаимосвязь с допуском на размер.

Волнистость характеризуется (рис. 1.2.14):

- средним арифметическим отклонением профиля волн W_a , мкм;
- базовой длиной l_w ;
- средней высотой волн W_z , мкм;
- наибольшей высотой профиля волн $W_{\max}$, мкм;
- высотой сглаживания волнистости W_p ;
- относительной опорной длиной профиля волн tp_w , %;
- средним шагом волн Sm_w , мм;
- средним радиусом выступов волн Rw_{cp} , мм.
- текущее расстояние от средней линии до вершины волны H_i ;
- текущее расстояние от средней линии до впадины волны H'_i ;
- текущее значение ординаты y_i ;
- текущее значение шага волны Sm_{wi} .

Для оценки волнистости поверхности на практике используют различные отраслевые нормали и рекомендации. Так, в подшипниковой промышленности при шлифовании колец (диаметром 18...120 мм) класса Н (класса 0) волнистость по высоте составляет 40...110 % шероховатости, а по классу С (4 – 5-й классы) – 15...60 %.

Волнистость в зависимости от ее высоты подразделяют на девять классов:

Высота волны, мкм	1	2	4	8	16	32	64	125	250
Класс волнистости	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX

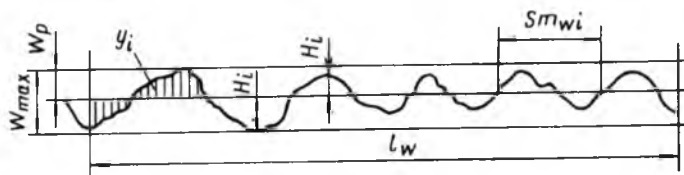


Рис. 1.2.13. Волнограмма поверхности

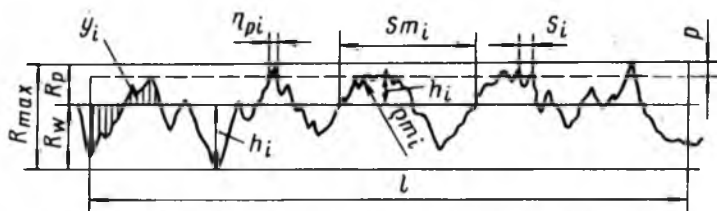


Рис. 1.2.14. Профилограмма шероховатости поверхности

Шероховатость в соответствии с ГОСТ 2789–73 характеризуется параметрами, приведенными на рис. 1.2.14:

- наибольшая высота профиля волн R_{max} ;
- глубина сглаживания профиля R_w ;
- высота сглаживания профиля R_p ;
- текущая величина ординаты профиля шероховатости y_i ;
- высота i -го наибольшего выступа профиля h_i ;
- высота i -й наибольшей впадины профиля h'_i ;
- значение i -го шага неровностей по средней линии в пределах базовой длины S_{mi} ;
- опорная длина i -го выступа профиля η_{pi} на уровне p ;
- радиус i -го выступа профиля шероховатости ρ_{mi} ;
- значение i -го шага по вершинам местных выступов S_i ;
- базовая длина L .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое служебное назначение изделия?
2. На какие виды делятся поверхности детали?
3. В чем разница между размерными и кинематическими связями?
4. Из каких модулей состоит изделие?
5. В чем разница между технологическими функциональными и обслуживающими модулями?
6. Какие показатели характеризуют качество конструкции изделия?
7. Как влияет геометрическая неточность изделия на выполнение служебного назначения?
8. Что такое геометрическая точность детали и с помощью каких показателей она описывается?
9. Что понимается под поверхностным слоем детали?
10. Перечислите основные показатели качества поверхностного слоя детали.

Глава 1.3

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ СВЯЗИ

Любой процесс, в том числе и технологический, осуществляется во времени и пространстве. В связи с этим важное значение приобретают временные и размерные связи как при выполнении изделием служебного назначения, так и в процессе его изготовления. Рассмотрим размерные связи, выражением которых являются размерные цепи, образуемые размерами деталей и расстояниями между деталями.

Размеры, которые включаются в размерные цепи, определяются относительным положением деталей, занимаемым ими в результате базирования.

Знание основ базирования, построения размерных цепей, методов их расчета является фундаментом для решения многих технологических задач.

1.3.1. ОСНОВЫ БАЗИРОВАНИЯ

Под *базированием* понимается процесс придания заготовке, детали, сборочной единице, изделию требуемого положения относительно выбранной системы отсчета.

Под *базой* понимается поверхность или выполняющие ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке, детали или изделию и используемая для базирования.

В основе правил базирования лежит известное в теоретической механике положение о том, что свободное абсолютно твердое тело имеет шесть степеней свободы относительно выбранной системы координат, а именно: три перемещения параллельно координатным осям и три вращения вокруг них. Отсюда положение этого тела относительно системы отсчета можно определить шестью независимыми координатами, выступающими в роли связей, каждая из которых лишает тело одной степени свободы. При этом каждая координата осуществляет двустороннюю связь. Это означает, что наложение на тело одной координаты лишает его возможности перемещаться (вращаться) в двух противоположных направлениях.

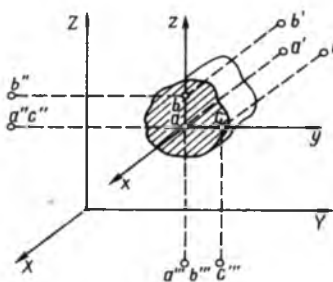


Рис. 1.3.1. Определение положения тела в пространстве

Найдем положение абсолютно твердого тела произвольной формы в системе координат XYZ (рис. 1.3.1). Для этого достаточно знать положение трех его точек, не лежащих на одной прямой. Положение каждой точки определяется тремя независимыми координатами. Возьмем на теле три точки a, b, c и запишем их координаты.

Положение точки a определяется координатами aa', aa'', aa''' , точки b — координатами bb', bb'', bb''' , точки c — координатами cc', cc'', cc''' . Приведенные девять координат лишают тело следующих степеней свободы:

координаты aa', aa'', aa''' — перемещения вдоль оси соответственно X, Y, Z ;

координаты bb', bb'', bb''' — вращения вокруг оси соответственно Y, X и перемещения вдоль оси Z ;

координаты cc', cc'', cc''' — вращения вокруг оси соответственно Z, X и перемещения вдоль оси Y .

Как видно на рис. 1.3.1, координаты bb''', cc'', cc''' вторично лишают тело степеней свободы, которых оно уже лишено. Таким образом, для лишения тела шести степеней свободы необходимо наложить на него шесть независимых координат. Координата не только лишает тело степени свободы, но и определяет расстояние точки тела относительно соответствующей координатной плоскости системы отсчета.

Детали в изделии соединяют совмещением баз присоединяемой детали с соответствующими базами базовой детали. В данном случае (рис. 1.3.2) у присоединяемой детали II базами являются поверхности, на которых построены координатные плоскости XOY, XOZ, YOZ , а базами детали I — поверхности, на которых построены координатные плоскости $X_1O_1Y_1, X_1O_1Z_1, Y_1O_1Z_1$. Примем за систему отсчета базы детали I. Тогда координаты $1 - 1_1, 2 - 2_1, 3 - 3_1, 4 - 4_1, 5 - 5_1, 6 - 6_1$ определяют положение детали II (см. рис. 1.3.2, а). В результате совмещения баз детали II с базами детали I координаты превратятся в шесть опорных точек (рис. 1.3.2, б).

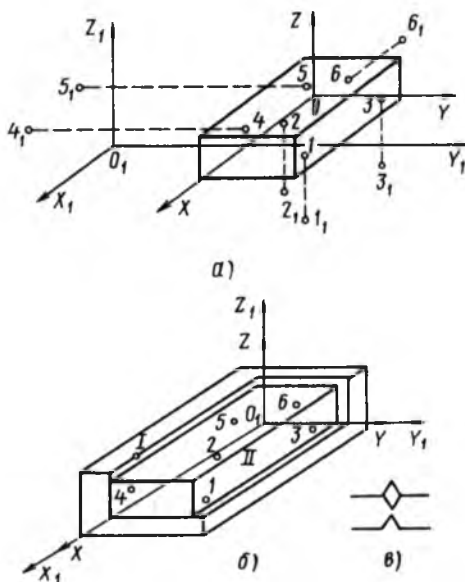


Рис. 1.3.2. Базирование детали II:

а – в координатной системе X, Y, Z ; *б* – после совмещения координатных систем X, Y, Z и X_1, Y_1, Z_1 ; *в* – условные изображения опорной точки

Получим *правило шести точек*, согласно которому для определения положения детали, рассматриваемой как абсолютно твердое тело, относительно другой детали (других деталей) необходимо и достаточно иметь шесть опорных точек, где каждая опорная точка лишает деталь одной степени свободы. Условное обозначение опорной точки показано на рис. 1.3.2, в.

Схему расположения опорных точек на базах заготовки, детали или изделия принято называть *схемой базирования*. Схемы базирования различаются распределением опорных точек по трем координатным плоскостям (при сохранении количества опорных точек на плоскостях $3 - 2 - 1$), как показано на рис. 1.3.3.

Любая схема базирования, лишаящая тело шести степеней свободы, реализуется с помощью набора из трех баз, которые принято называть *комплексом баз*. Базы, составляющие комплекс, различаются лишаемыми степенями свободы и их числом и в соответствии с этим называются установочной, направляющей, опорной, двойной направляющей и двойной опорной.

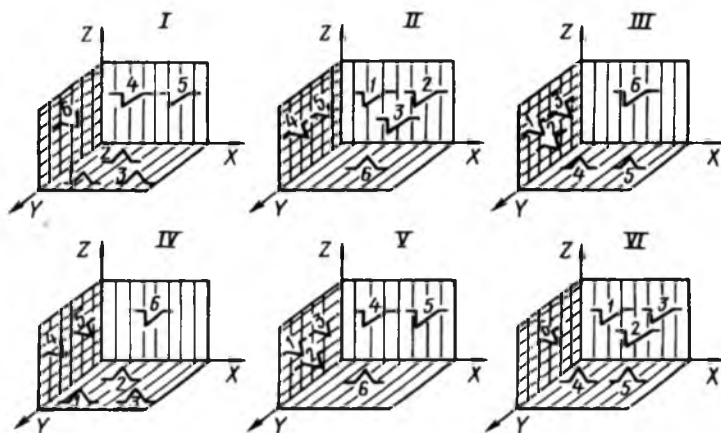


Рис. 1.3.3. Схемы расположения опорных точек по координатным плоскостям:

I – VI – варианты расположения опорных точек

Установочной называют базу, используемую для наложения на заготовку или изделие связей, лишаящих их трех степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и поворотов вокруг двух других осей.

Например, если деталь призматическая (см. рис. 1.3.2), то роль установочной базы выполняет нижняя поверхность, используемая для наложения трех связей (точки 1, 2, 3), лишаящих деталь возможности перемещаться в направлении оси OZ и поворачиваться вокруг осей, параллельных OX и OY .

Установочная база отличается большой площадью, чтобы можно было по возможности дальше разнести опорные точки, для придания детали большей устойчивости.

Направляющей называют базу, используемую для наложения на заготовку или изделие связей, лишаящих их двух степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг другой оси. Для детали призматической формы (см. рис. 1.3.2) – это боковая поверхность детали, наложение через которую двух связей (точки 4, 5) на деталь

лишило ее возможности перемещения в направлении оси OY и поворота вокруг оси, параллельной OZ .

Направляющая база отличается большой протяженностью, что позволяет расположить опорные точки на максимальном удалении друг от друга и тем самым увеличить точность направления. Действительно, если расстояние между двумя опорными точками обозначить через b , а погрешность установки детали на одной из этих опорных точек через a , то погрешность направления будет определяться $\operatorname{tg} \alpha = a / b$. Отсюда, чем больше b при $a = \text{const}$, тем меньше погрешность направления.

Опорной называют базу, используемую для наложения на заготовку или изделие связи, лишаящей их одной степени свободы – перемещения вдоль одной координатной оси или поворота вокруг координатной оси.

В примере на рис. 1.3.2 в качестве опорной базы использована задняя стенка детали. Через эту поверхность деталь лишена возможности перемещения в направлении оси OX (точка b). Для опорной базы не требуется поверхности больших размеров.

Двойной направляющей называют базу, используемую для наложения на заготовку или изделие связей, лишаящих их четырех степеней свободы – перемещений вдоль двух координатных осей и поворотов вокруг этих осей.

Наложение связей на деталь или заготовку с помощью цилиндрической (конической) поверхности чаще всего осуществляется через ось (рис. 1.3.4, a) точки 1, 2, 3, 4, относительно которой она образована вращением образующей прямой.

Двойной опорной называют базу, используемую для наложения на заготовку или изделие связей, лишаящих их двух степеней свободы (рис. 1.3.4, b , точки 4, 5) – перемещений вдоль двух координатных осей.

В отличие от направляющей базы, с помощью которой деталь лишается одного перемещения и одного поворота, двойную опорную базу используют для лишения детали двух перемещений.

Как правило, в качестве двойной опорной базы используется поверхность вращения.

Если деталь лишается всех степеней свободы, то считается, что она имеет полный комплект баз, которые образуют координатный угол.

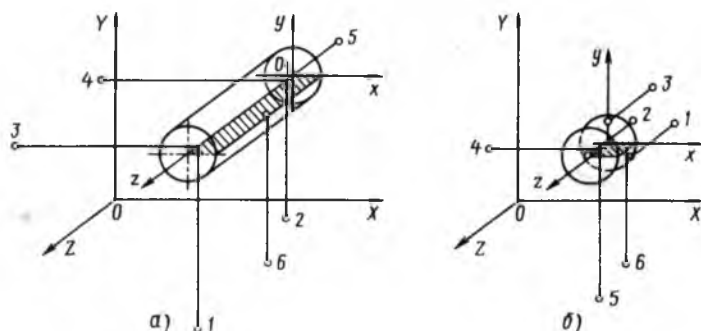


Рис. 1.3.4. Схемы базирования деталей типа тел вращения:

a – вал; *б* – диск

Если для детали в соответствии с ее функциями оставляют одну или несколько степеней свободы, то соответственно уменьшают потребное число опорных точек и число баз, и тогда комплект баз будет неполным.

Из рассмотренного перечня баз возможны четыре варианта комплектов баз:

У-Н-О; *У-ДО-О*; *ДН-О-О*; *ДН-ДО*,

где *У* – установочная база; *Н* – направляющая база; *О* – опорная база; *ДН* – двойная направляющая база; *ДО* – двойная опорная база.

По характеру проявления базы могут быть явными и скрытыми.

Явной называют базу, материализованную в виде реальной поверхности, разметочной риски или точки пересечения рисок.

Скрытой базой называют базу в виде воображаемой плоскости, оси или точки.

К скрытым базам прибегают тогда, когда у детали, заготовки отсутствуют необходимые поверхности.

Например, крышка имеет только установочную базу (см. рис. 1.3.5), образованную опорными точками 1, 2, 3 (рис. 1.3.5, б). Чтобы получить полный комплект баз, необходимо построить две недостающие координатные плоскости и на них расположить воображаемые три опорные точки 4, 5, 6, доведя их общее число до шести.

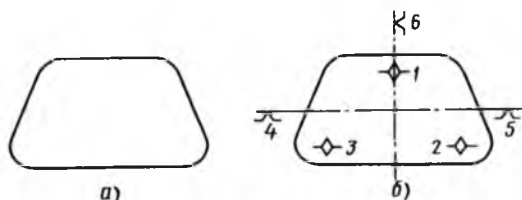


Рис. 1.3.5. Базирование крышки:

а – общий вид; б – схема базирования крышки

Наложение связей на скрытые базы может быть осуществлено визуально, либо с помощью специальных технических средств. В первом случае человек, оценивая положение воображаемых координатных плоскостей относительно системы отсчета, придает нужное положение детали или заготовке (таким примером может служить установка заготовки на магнитной плите плоскошлифовального станка). Для повышения точности базирования могут быть применены измерительные приборы или инструменты.

Однако на практике применять скрытые базы неудобно. Чтобы сократить затраты времени на базирование по скрытым базам и повысить его точность, применяют различного рода центрирующие средства, например, центры, самоцентрирующий патрон, самоцентрирующие призмы и др.

На рис. 1.3.6 показано базирование рычага по двум плоскостям симметрии, осуществленное с помощью одновременно равномерно сходящихся призм, реализующие базирование по скрытой базе 4, 5.

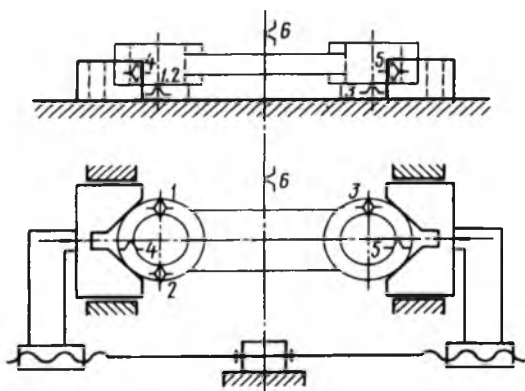


Рис. 1.3.6. Базирование рычага

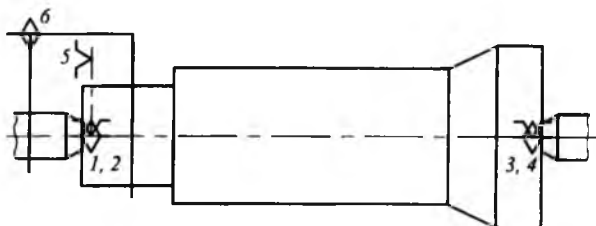


Рис. 1.3.7. Базирование вала в центрах с односторонним поводком

В ряде случаев скрытые базы стараются материализовать и превратить их в явные, что позволяет сократить затраты времени на базирование. Материализация без осуществляется посредством создания реальных поверхностей или разметочных линий и точек, представляющих собой следы пересечения координатных плоскостей. Например, в результате применения хомутика материализуют у шпинделя (вала) опорную точку 6 (рис. 1.3.7). Хомутик, жестко закрепленный на заготовке, становится частью заготовки и, касаясь поводкового пальца патрона, тем самым материализует точку 6.

Как отмечалось выше, при соединении деталей координаты, лишаящие деталь соответствующих степеней свободы, накладывают на нее двусторонние связи. В отличие от координатной связи опорная точка накладывается на деталь одностороннюю связь. Это означает, что деталь лишается возможности перемещения (вращения) только в одном направлении – в направлении опорной точки. Но детали ничто не препятствует перемещаться (вращаться) в обратном направлении. В то же время для нормального функционирования машины, механизма каждая их деталь должна сохранить положение, приобретенное ею в результате базирования. Однако во время работы изделия действуют различные силы и образующие ими моменты, которые стремятся нарушить первоначальное положение деталей. Поэтому при базировании детали необходимо не только достигнуть требуемого ее положения в изделии, но и сохранить его на время эксплуатации изделия.

В связи с изложенным возникли понятия определенности и неопределенности базирования.

Под *определенностью базирования* объекта (детали, заготовки, сборочной единицы) понимается неизменность его баз и расположения опорных точек на базах в процессе работы изделия или его изготовления, обеспечивающих постоянность положения объекта.

Под *неопределенностью базирования* понимается изменение требуемого положения объекта в результате изменения баз или расположения опорных точек на базах (в качестве примера изменения расположения опорных точек можно рассматривать стол с четырьмя ножками, установленный на неровном полу; в зависимости от того, в каком месте опираются на стол, в контакт с полом будут входить разные наборы трех ножек из четырех).

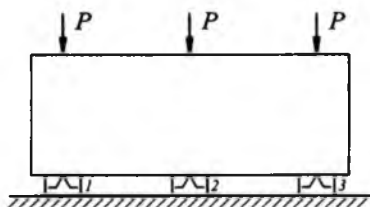


Рис. 1.3.8. Схема приложения силового замыкания:
1, 2, 3 – опорные точки

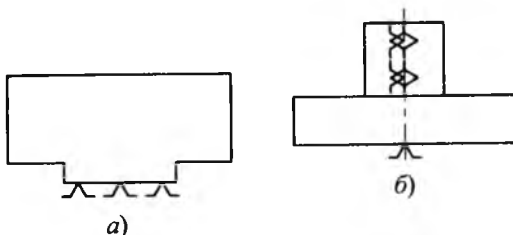
Определенность базирования детали обеспечивается приложением к ней сил, создающих силовое замыкание присоединяемой детали. Силы и моменты, создающие силовое замыкание, должны быть больше сил и моментов, стремящихся нарушить положение детали в машине. Для создания силового замыкания используют упругие силы, силы трения, силы тяжести деталей, магнитные и электромагнитные силы и др. При этом силы должны быть направлены на опорные точки.

Силовое замыкание и опорная точка обуславливают двустороннюю связь и лишают деталь степени свободы в противоположных направлениях. Отсюда вытекает главное требование к созданию силового замыкания: оно должно быть направлено на опорную точку (рис. 1.3.8).

Неопределенность базирования приводит к погрешности относительного положения или движения деталей в изделии, и поэтому она нежелательна. Причинами неопределенности базирования являются неправильные конструктивные решения, неправильное приложение силового замыкания, а также наличие зазоров в соединении деталей.

Неправильное конструктивное решение обычно является следствием несоблюдения основных правил базирования. Например, за установочную базу не следует принимать поверхность небольших размеров, а за направляющую базу – поверхность малой протяженности (рис. 1.3.9).

Рис. 1.3.9. Схемы базирования, вызывающие неопределенность базирования при неправильном выборе:
а – установочной базы;
б – двойной направляющей базы



Неправильное приложение силового замыкания является результатом нарушения правил его осуществления, когда его величина меньше сил и моментов, стремящихся нарушить первоначальное положение детали, или силовое замыкание направлено не на опорную точку.

Наличие зазоров в соединениях, как правило, обусловлено требованием посадок. Если деталь должна перемещаться, то в соединении должен быть зазор, который и вызовет неопределенность базирования. Следовательно, необходимо рассчитывать зазоры и устанавливать требуемые допуски на них, принимая во внимание не только посадки, но и погрешность, вызываемую неопределенностью базирования.

Из изложенного следует, что для обеспечения определенности базирования необходимо выполнять требования, предъявляемые к базам по размерам, геометрической форме, и правильно осуществлять силовое замыкание.

По назначению все рассмотренные выше базы могут быть конструкторскими, технологическими, измерительными.

Базы, с помощью которых базируются детали или сборочные единицы в изделии, называют конструкторскими. Конструкторские базы делятся на основные и вспомогательные.

Основной называют конструкторскую базу, принадлежащую детали или сборочной единице и используемую для определения их положения в изделии.

Вспомогательной называют конструкторскую базу, принадлежащую детали или сборочной единице и используемую для определения положения присоединяемой к ним детали или сборочной единицы. Следует заметить, что любая деталь может иметь только один комплект основных баз, а комплектов вспомогательных баз столько, сколько деталей или сборочных единиц к ней присоединяется.

Технологической называют базу, используемую для определения положения заготовки, детали или изделия в процессе изготовления, сборки или ремонта. Понятие технологической базы распространяется на все стадии процесса изготовления изделия (изготовление детали механической обработкой, сборку изделия и т.д.).

Измерительной называют базу, используемую для определения положения заготовки, детали или изделия и средств измерения и ее применяют при оценке точности детали, настройке станков и т.д.

Классификация баз приведена на рис. 1.3.10.



Рис. 1.3.10. Классификация баз

1.3.2. РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ

В процессе изготовления и эксплуатации изделий действуют многочисленные факторы, вызывающие геометрические погрешности, которые оказывают отрицательное влияние на качество и эффективность эксплуатации изделия.

Понимание закономерностей образования этих погрешностей, умение их рассчитывать и прогнозировать во времени позволяет предпринимать соответствующие меры как на этапе проектирования изделия, так и в процессе его изготовления и эксплуатации.

Эффективным инструментом решения этих задач являются размерные цепи, отражающие размерные связи конструкции изделий и процессов их изготовления.

Во всех случаях в качестве размерных связей выступают или размеры материальных объектов (деталей, сборочных единиц и т.п.) или расстояния между ними.

С помощью размерных цепей:

- конструктор рассчитывает нормы точности на детали и сборочные единицы;
- технолог анализирует погрешности изготовления и находит пути их сокращения;
- потребитель определяет методы поддержания на заданном уровне точности изделия в процессе эксплуатации.

В основе теории размерных цепей лежит определение расстояния между деталями, сборочными единицами или определения их размера как функции размеров, непосредственно влияющих на их значение.

Исторически формирование теории размерных цепей шло по пути разработки методов расчета плоских размерных цепей.

В плоских размерных цепях под звеном размерной цепи понимается относительное положение деталей, определяемое с помощью или одного размера или одного поворота (углового размера).

Если рассматривать относительное положение двух деталей как пространственную задачу, то звено размерной цепи будет описываться шестью параметрами: тремя линейными и тремя угловыми размерами.

Ниже излагаются основные положения теории плоских размерных цепей, а в конце параграфа рассматриваются основные положения теории пространственных размерных цепей.

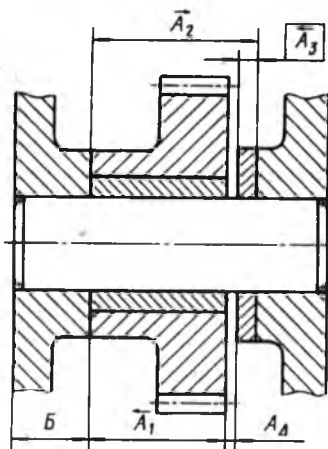


Рис. 1.3.11. Конструкторская размерная цепь зазора A_4

Основные понятия и определения.

Размерной цепью называют совокупность размеров, непосредственно участвующих в решении поставленной задачи и образующих замкнутый контур. Из определения следует, что размерную цепь образует замкнутый контур не любых размеров, а только тех размеров, которые непосредственно участвуют в решении поставленной задачи. Например, если поставлена задача обеспечить зазор между зубчатым колесом и торцом проставочного кольца, то (рис. 1.3.11) в размерную цепь включаются только те размеры (A_1, A_2, A_3, A_4), изменение которых непосредственно влияет на величину зазора (A_4). Если же в том же примере изменить величину размера B корпуса, то при $A_2 = \text{const}$ как бы его не уменьшали или

увеличивали, величина A_4 останется неизменной.

Размерные цепи принято обозначать прописными буквами русского алфавита $A, B, \dots$, если они образованы линейными размерами, и строчными буквами греческого алфавита $\alpha, \beta, \gamma, \dots$, если их составляют угловые размеры.

Размеры, образующие размерную цепь, называют *звеньями размерной цепи*. Так, все размеры A_i , образующие размерную цепь A на рис. 1.3.11, являются ее звеньями.

На схемах размерных цепей их звенья условно обозначаются следующим образом:

линейные размеры (рис. 1.3.12, а) – двусторонними стрелками;

угловые размеры (рис. 1.3.12, б) – односторонними стрелками с направлением острия к базе;

угловой размер с отклонением от перпендикулярности – рис. 1.3.12, в.

Для обозначения звеньев размерных цепей используют те же буквы, что и для обозначения самих размерных цепей, с добавлением соответствующих индексов. В любой размерной цепи одно из звеньев является замыкающим, все остальные – составляющими звеньями.

Замыкающим называют звено размерной цепи, являющееся исходным при постановке задачи или получающееся последним в результате ее решения и оно обозначается буквой с индексом "Δ". Если исходя из заданного допуска на зазор надо определить, допуски на составляющие звенья, то A_{Δ} будет исходным звеном размерной цепи. Если же в качестве исходных данных заданы отклонения составляющих звеньев и требуется определить, какое при этом получится отклонение на звене A_{Δ} , то оно будет называться замыкающим звеном.

Составляющим звеном называется звено, с изменением величины которого непосредственно изменяется величина замыкающего звена.

По характеру влияния на величину замыкающего звена составляющие звенья подразделяются на увеличивающие и уменьшающие. Увеличивающим называют составляющее звено размерной цепи, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается (например, звено A_2 на рис. 1.3.11). Уменьшающим называют составляющее звено размерной цепи, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается (например, звенья A_1 и A_3 на рис. 1.3.11). Увеличивающее звено обозначают стрелкой над буквой, обозначающей звено, направленной вправо, уменьшающее звено – стрелкой, направленной влево (см. рис. 1.3.11).

Компенсирующим называется звено, изменением которого уменьшают отклонение замыкающего звена. Для отличия компенсирующего звена от других звеньев оно обозначается в прямоугольной рамке (рис. 1.3.11, размер A_3).

На рис. 1.3.13 приведена классификация плоских размерных цепей, подразделяющихся по виду размера, подчиненности, по характеру связей между размерными цепями и назначению.

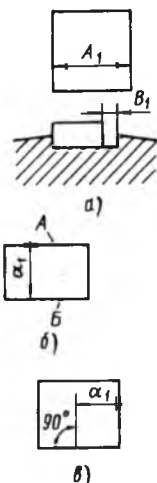


Рис. 1.3.12. Примеры обозначения звеньев размерных цепей:

а – звенья линейной размерной цепи; б, в – звенья угловой цепи

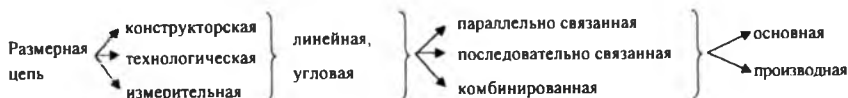


Рис. 1.3.13. Классификация размерных цепей

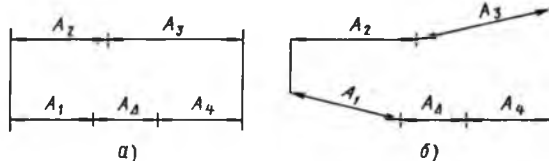


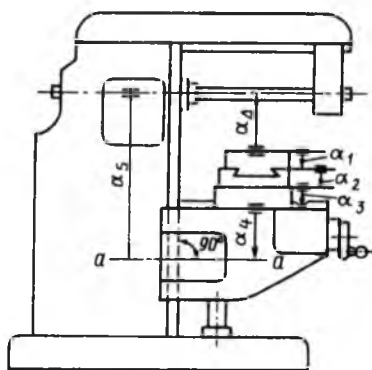
Рис. 1.3.14 Линейные размерные цепи:

- а — с размерами, совпадающими по направлению с замыкающим звеном;
 б — содержащие размеры, расположенные под углом к замыкающему звену

Под *линейной размерной цепью* понимают размерную цепь, звеньями которой являются линейные размеры (рис. 1.3.14. а). Линейная размерная цепь может содержать размеры, которые по направлению не совпадают с направлением размера замыкающего звена (рис. 1.3.14. б).

Под *угловой размерной цепью* понимают размерную цепь, звеньями которой являются угловые размеры (повороты) поверхностей (рис. 1.3.15) (часто такие размерные цепи называют размерными цепями относительных поворотов).

Звенья размерной цепи могут быть расположены в одной или нескольких параллельных плоскостях; в первом случае размерную цепь называют *плоской*, во втором — *пространственной*.



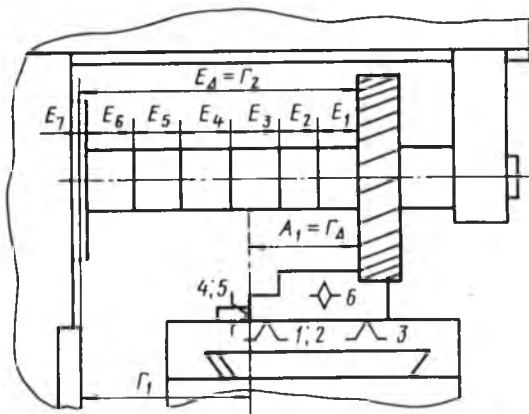


Рис. 1.3.16. Основная Γ и производная E цепи

При желании содержание составляющих звеньев может быть раскрыто с помощью производных (размерных) цепей, как это сделано, например, со звеном Γ_2 с помощью производной размерной цепи E .

По характеру связей между собой размерные цепи могут быть параллельно связанными, последовательно связанными и параллельно-последовательно связанными.

Параллельно связанными называют размерные цепи, имеющие одно или несколько общих звеньев составляющих звеньев (рис. 1.3.17, а). Особенность таких размерных цепей состоит в том, что общие звенья участвуют в достижении точности замыкающих звеньев одновременно всех размерных цепей, в состав которых они входят.

Последовательно связанными называют размерные цепи, из которых каждая последующая цепь имеет общую базу с предыдущей (рис. 1.3.17, б).

Размерные цепи с комбинированными связями обладают свойствами параллельно и последовательно связанных цепей (рис. 1.3.17, в).

Задачи, решаемые с помощью размерных цепей, бывают конструкторскими, технологическими и измерительными.

Конструкторской называют размерную цепь, определяющую расстояние или относительный поворот поверхностей или осей поверхностей в изделии. Примером конструкторской размерной цепи может служить размерная цепь A , показанная на рис. 1.3.11.

Технологической называют размерную цепь, обеспечивающую требуемое расстояние или относительный поворот поверхностей изделия в процессе его изготовления.

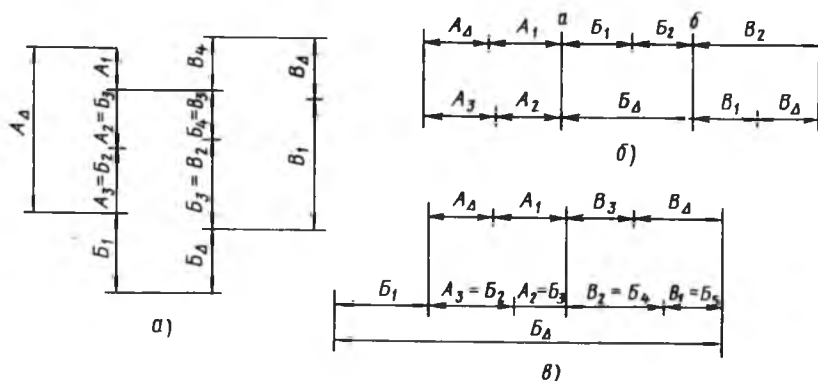


Рис. 1.3.17. Три вида связей размерных цепей:

а – параллельный; *б* – последовательный; *в* – параллельно-последовательный

Технологические размерные цепи возникают в процессе сборки машины, сборочных единиц и в процессе изготовления деталей. Технологические размерные цепи могут отображать связи между операциями (переходами) технологического процесса в получении того или иного размера (рис. 1.3.18, *б*) и образовании размера при выполнении перехода на технологической системе (рис. 1.3.18, *а*) или роль отдельных этапов операции в обеспечении точности выдерживаемого размера (рис. 1.3.18, *а*).

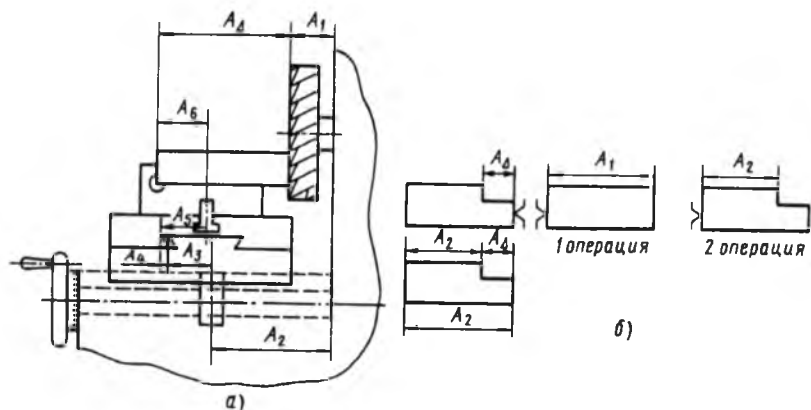


Рис. 1.3.18. Технологические размерные цепи:

а – первого типа; *б* – второго типа

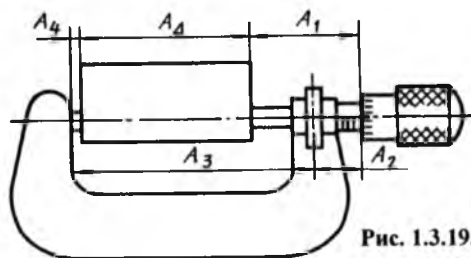


Рис. 1.3.19. Измерительная размерная цепь

Измерительной называют размерную цепь, с помощью которой познаются значения измеряемого размера, расстояния, относительного поворота поверхностей или их осей изготавливаемого (изготовленного) изделия.

На рис. 1.3.19 показана измерительная размерная цепь *A*, определяющая расстояние между торцами плитки, измеряемое микрометром.

Построение размерных цепей. Размерные цепи отражают размерные связи конструкции изделия, процессов изготовления и измерения.

В свою очередь изготовление деталей, сборка сборочных единиц, изделий и процесс измерения осуществляются с помощью технологических и измерительных систем, представляющих собой соответствующие конструкции.

Таким образом, во всех случаях составляющими звеньями размерных цепей будут размеры деталей или расстояния между ними. Поэтому для построения размерных цепей должны быть известны соответственно конструкторские, технологические и измерительные базы. Первые позволяют определить положение деталей в конструкции изделия, технологической системы и измерительной системы, а вторые и третьи – положение заготовки, детали и измеряемого объекта.

Построение размерной цепи начинается с определения замыкающего звена, отражающего решаемую задачу. Поэтому вначале должна быть поставлена и четко сформулирована задача, решение которой необходимо для обеспечения соответствия конструкции изделия его служебному назначению, обеспечения требуемой точности изделия при изготовлении или оценке его точности измерением.

При конструировании изделия переход от формулировки задачи к нахождению замыкающего звена заключается в выявлении такого линейного или углового размера, от значения которого полностью зависит решение поставленной задачи. *При изготовлении* изделия замыкающим звеном размерной цепи является размер, точность которого должна быть

обеспечена технологическим процессом. При измерении замыкающим звеном является измеренный размер.

Допуск замыкающего звена устанавливают следующим образом:

в конструкторских размерных цепях – исходя из служебного назначения изделия или его механизма;

в технологических размерных цепях – в соответствии с допуском на расстояние или относительный поворот поверхностей детали (их осей) или деталей изделия, которые необходимо получить в результате технологического процесса изготовления детали или сборки изделия;

в измерительных размерных цепях – исходя из требуемой точности измерения.

Выявление составляющих звеньев конструкторских размерных цепей. На рис. 1.3.20 показано устройство, состоящее из вала, трех колец и штифта. Для того чтобы кольца 2 и 3 могли свободно вращаться на валу 1, между торцами колец 3 и 4 должен быть гарантированный зазор, величину которого и примем за замыкающее звено A_Δ . Задача заключается в том, чтобы найти размеры, являющиеся составляющими звеньями, образующие A_Δ .

Составляющими звеньями размерной цепи конструкции являются расстояния (относительные повороты) между поверхностями вспомога-

тельных и основных баз деталей, непосредственно участвующих в решении поставленной задачи своими размерами, а также зазоры. В соответствии с изложенным найдем составляющие звенья линейной размерной цепи A .

На чертеже устройства видны основные и вспомогательные базы деталей, участвующие в образовании A_Δ .

Чтобы найти детали, чьи размеры участвуют в образовании замыкающего звена A_Δ , можно воспользоваться следующим способом: к каждой из поверхностей, образующих замыкающее звено, следует мысленно приложить силы P параллельно размеру A_Δ и на-

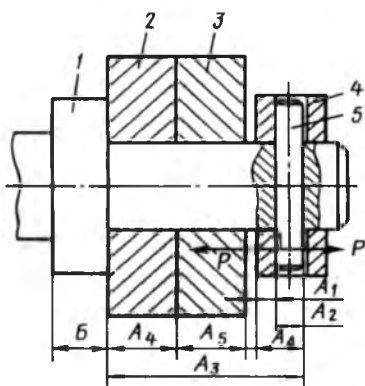


Рис. 1.3.20. Размерная цепь конструкторская

правленные в противоположные стороны. Действие силы P влево вызовет перемещение кольца 3 до соприкосновения с кольцом 2; произойдет контакт основной базы кольца 3 со вспомогательной базой кольца 2.

Если допустить, что кольцо 2 неподвижно, то при изменении ширины кольца 3 (размер A_3) величина замыкающего звена изменится. Следовательно, размер A_3 надо считать составляющим звеном размерной цепи A .

Сила P , передаваемая кольцом 3, вызовет перемещение кольца 2, пока он не войдет в соприкосновение с буртиком вала 1.

Если считать буртик вала 1 неподвижным, то при изменении ширины кольца 2 (размер A_4) произойдет изменение величины замыкающего звена A_Δ . Поэтому размер A_4 является составляющим звеном размерной цепи A .

Согласно конструкции устройства, буртик вала 1 является неподвижным, поэтому дополнительное движение колец 2 и 3 становится невозможным. Тогда следует обратиться к правой стороне замыкающего звена A_Δ . Сила P , действуя на кольцо 4, будет смещать его до тех пор, пока образующая отверстия в нем под штифт 5 не соприкоснется с образующей штифта 5. Если допустить, что штифт 5 неподвижен, то при изменении величины размера A_1 будет изменяться величина A_Δ . На основании этого размер A_1 примем за составляющее звено размерной цепи A .

Сила P , действуя через кольцо 4 на штифт 5, должна прижать его к правой стороне отверстия в валу 1. Поскольку штифт 5 соединен с валом 1 по неподвижной посадке, постольку он неподвижен и движение не произойдет. Если изменить диаметральный размер A_2 , то сместится и кольцо 4, в результате изменится размер A_Δ . Поэтому звено A_2 следует считать составляющим звеном размерной цепи A .

Дальнейшее смещение кольца 4 под действием силы P становится невозможным, так как отверстие под штифт 5 находится в валу 1; остается только замкнуть размерную цепь A размером A_3 .

На рис. 1.3.20 показан также размер B (ширина буртика). Включить B в размерную цепь можно только в том случае, если изменение его величины изменит размер A_Δ . Изменить величину B можно только в левую сторону, так как изменение в правую сторону вызовет изменение размера A_3 , а изменение B в левую сторону не нарушит размер A_Δ . Отсюда следует, что размер B нельзя включать в размерную цепь A .

Аналогичным образом строятся технологическая размерная цепь размера, получаемого на технологическом переходе, и измерительная размерная цепь.

1.3.2.1. Методы достижения точности замыкающего звена

Графически размерная цепь представляет собой замкнутый контур размеров, из чего следует, что величина замыкающего звена является функцией составляющих звеньев:

$$A_{\Delta} = f(A_1, A_2, \dots, A_{m-1}),$$

где A_{Δ} – замыкающее звено; A_i – составляющее звено; m – число звеньев в размерной цепи.

Из схемы плоской размерной цепи с параллельными звеньями (рис. 1.3.21) видно, что номинальное значение замыкающего звена A_{Δ} равно алгебраической сумме номинальных значений составляющих звеньев:

$$A_{\Delta} = -A_1 + A_2 + A_3 - A_4,$$

в которой увеличивающие звенья имеют знак "+", а уменьшающие – знак "-"; увеличивающее звено указывается стрелкой, направленной вправо, а уменьшающее звено – стрелкой, направленной влево. Тогда

$$A_{\Delta} = -\bar{A}_1 + \bar{A}_2 + \bar{A}_3 - \bar{A}_4.$$

Если плоская размерная цепь содержит звено A_3 , распложенное под углом α к направлению замыкающего звена (рис. 1.3.22), то оно включится в размерную цепь своей проекцией на направление замыкающего звена, поэтому его отклонение скажется в меньшей степени на величине замыкающего звена.

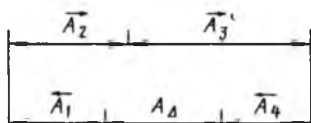


Рис. 1.3.21. Плоская размерная цепь с параллельными звеньями

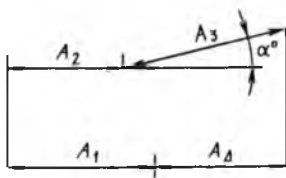


Рис. 1.3.22. Плоская размерная цепь с угловым звеном

В связи с этим был введен коэффициент, названный передаточным отношением ξ . Тогда в общем виде уравнение плоской размерной цепи можно записать как алгебраическую сумму произведений:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} A_i \quad (1.3.1)$$

или

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \bar{A}_i - \sum_{n+1}^{m-1} \bar{A}_i, \quad (1.3.2)$$

где $i = 1, 2 \dots$ порядковый номер составляющего звена; m – число звеньев размерной цепи; ξ_{A_i} – передаточное отношение i -го составляющего звена (для плоских размерных цепей с параллельными звеньями $\xi_i = 1$ – для увеличивающих составляющих звеньев и $\xi_i = -1$ – для уменьшающих составляющих звеньев).

В процессе изготовления деталей и сборки изделий действуют многочисленные факторы, вызывающие погрешности размеров, в результате чего всегда фактическое значение звена размерной цепи отклоняется от его номинального значения.

Говоря о погрешностях звеньев, следует различать погрешности одного изделия и погрешности группы изделий:

- для одного изделия *погрешности звеньев* имеют определенные значения и направление в сторону уменьшения или увеличения фактического значения размера от номинального;
- для группы изделий под *погрешностью звена* понимается поле рассеяния погрешностей ω .

Учитывая изложенное, звено размерной цепи (рис. 1.3.23) в общем случае будет характеризоваться номинальным значением $A_{\text{ном}}$, полем рассеяния, координатой поля рассеяния Δ_{ω} .

Что касается конкретного значения звена размерной цепи одного изделия, то его величина A_i будет лежать в пределах границ поля рассеяния.

Конструктор при разработке чертежей деталей, понимая неизбежность наличия погрешностей размеров, назначает на каждый размер соответствующий допуск T , ограничивающий погрешность. В этом случае вместо ω и Δ_{ω} пользуются полем допуска и координатой середины поля допуска Δ_0 .

Чтобы получить годное изделие, надо, чтобы в результате его изготовления должно быть обеспечено $\omega \leq T$.

Номинальные размеры и координаты середин полей допусков имеют знаки и потому суммируются алгебраически, а допуски и поля рассеяния не имеют знака и поэтому суммируются арифметически.

Отсюда следует, что для расчета плоской размерной цепи с параллельными звеньями необходимо решить три уравнения: номинальных размеров, координат середин полей рассеяния (допусков) и полей рассеяния (допусков).

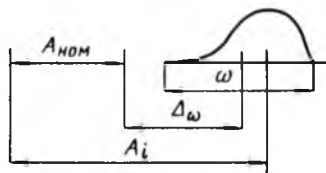


Рис. 1.3.23. Схема характеристик звена размерной цепи

Так, например, для размерной цепи, приведенной на рис. 1.3.21:
уравнение номинальных размеров

$$A_{\Delta} = -\bar{A}_1 + \bar{A}_2 + \bar{A}_3 - \bar{A}_4;$$

уравнение полей допусков

$$T_{A_{\Delta}} = T_{A_1} + T_{A_2} + T_{A_3} + T_{A_4},$$

где $T_{A_{\Delta}}$ – допуск замыкающего звена; T_{A_i} – допуск i -го составляющего звена;

уравнение координат середин полей допусков

$$\Delta_{0A_{\Delta}} = -\Delta_{0A_1} + \Delta_{0A_2} + \Delta_{0A_3} - \Delta_{0A_4},$$

где $\Delta_{0A_{\Delta}}$ – координата середины поля допуска замыкающего звена;

Δ_{0A_i} – координата середины поля допуска i -го составляющего звена.

В общем случае имеем:

$$T_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| T_i. \quad (1.3.3)$$

Таким образом, *поле допуска замыкающего звена плоской размерной цепи с параллельными звеньями равно сумме абсолютных значений полей допусков всех составляющих звеньев*:

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^n \xi_i \bar{\Delta}_{0i} - \sum_{n+1}^{m-1} \xi_I \bar{\Delta}_{0i} \quad (1.3.4)$$

или

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0i}. \quad (1.3.5)$$

При расчете величины $\Delta_{0\Delta}$ надо учитывать не только знаки Δ_{0i} , но и знаки их составляющих звеньев.

Пусть имеем $-\Delta_{01}, -\Delta_{02}, \Delta_{03}, \Delta_{04}$. Тогда с учетом знаков составляющих звеньев $-A_1, A_2, A_3, -A_4$ будем иметь

$$\Delta_{0A_\Delta} = -(\Delta_{0A_1}) + (-\Delta_{0A_2}) + (\Delta_{0A_3}) - (\Delta_{0A_4}).$$

Таким образом, координаты середины поля допуска замыкающего звена плоской размерной цепи с параллельными звеньями равна алгебраической сумме координат середин полей допусков составляющих звеньев с учетом знаков составляющих звеньев.

Формула, учитывающая связь поля рассеяния значений замыкающего звена (его отклонений) с полями рассеяния значений составляющих звеньев (их отклонений), может быть получена путем аналогичных рассуждений. Не прибегая к ним, приведем формулу в общем виде:

$$\omega_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| \omega_i; \quad (1.3.6)$$

для плоских размерных цепей с параллельными звеньями

$$\omega_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \omega_i. \quad (1.3.7)$$

Все рассуждения, касающиеся координат середин полей допусков, в полной мере распространяются и на координаты середин полей рассеяния. Поэтому по аналогии будем иметь

$$\Delta\omega_\Delta = \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}_{\omega_i} - \sum_n^{m-1} \bar{\Delta}_{\omega_i} \quad (1.3.8)$$

или

$$\Delta\omega_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{\omega_i}. \quad (1.3.9)$$

При расчетах допусков и полей рассеяния звеньев размерных цепей существует два принципиально разных подхода:

- расчет на максимум–минимум;
- вероятностный расчет.

Метод расчета на максимум–минимум учитывает только предельные отклонения звеньев размерной цепи и самые неблагоприятные их сочетания. Например, в размерной цепи A , показанной на рис. 1.3.24, $A_\Delta = -A_1 + A_2$. Предельные отклонения замыкающего звена будут при следующих сочетаниях предельных отклонений составляющих звеньев:

$$\Delta_{вA_\Delta} = -\Delta_{нA_1} + \Delta_{вA_2}; \quad \Delta_{нA_\Delta} = -\Delta_{вA_1} + \Delta_{нA_2};$$

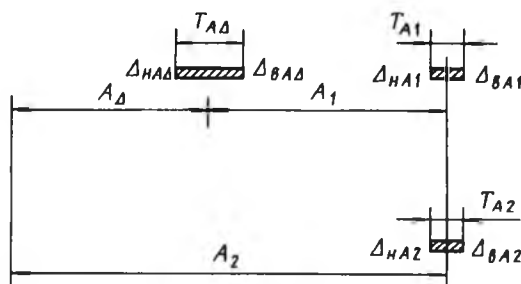


Рис. 1.3.24. Размерная цепь и поля допусков

Вычитая почленно из первого равенства второе, получим

$$(\Delta_{BA\Delta} - \Delta_{HA\Delta}) = (-\Delta_{HA1} + \Delta_{BA1}) + (\Delta_{BA2} - \Delta_{HA2}).$$

Разность верхнего и нижнего предельных отклонений есть поле допуска, в пределах которого допустимы отклонения звена, поэтому

$$T_{A\Delta} = T_{A1} + T_{A2}.$$

Вероятностный метод расчета учитывает рассеяние размеров и вероятность различных сочетаний отклонений составляющих звеньев размерной цепи. Теоретическую основу для установления связи между полем допуска замыкающего звена и полями допусков составляющих звеньев размерной цепи составляют положения теории вероятностей. В связи с этим будем рассматривать замыкающее звено y как функцию случайных аргументов x_i .

На основании теории вероятностей можно утверждать, что среднее значение будет функцией средних значений аргументов:

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n).$$

Для ограничения рассеяния случайных отклонений функции и аргументов полями допусков воспользуемся формулой об их дисперсиях, которую в данном случае удобно представить в виде зависимости средних квадратических отклонений:

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n (\partial y / \partial x_i)_{\bar{x}_i}^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{j \neq l}^n (\partial y / \partial x_j)_{\bar{x}_j} (\partial y / \partial x_l)_{\bar{x}_l} \sigma_{x_j} \sigma_{x_l} \sigma_{x_{jl}}.$$

Рассматривая составляющие звенья размерной цепи как независимые величины и принимая отсутствие корреляционной связи между допусками на составляющие звенья, можно воспользоваться зависимостью

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n (\partial y / \partial x_i)_{x_i}^2 \sigma_{x_i}^2.$$

При теоретических расчетах полем допуска T ограничивается рассеяние случайных отклонений, распределенных по нормальному закону, в пределах 6σ . Поэтому

$$T_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial y / \partial x_i)_{x_i}^2 T_{x_i}^2 k_{x_i}^2},$$

где k_{x_i} – коэффициент, учитывающий закон распределения отклонений аргументов через коэффициент λ_{x_i} и принятый процент риска, обуславливающий выход значений функции y за пределы установленного допуска $k_{x_i} = \lambda_{x_i}$; здесь t – коэффициент риска.

Отсюда

$$T_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 T_i^2}, \quad (1.3.10)$$

где t_{Δ} – коэффициент риска, характеризующий процент выхода значений замыкающего звена за пределы установленного на него допуска; λ_i – коэффициент, характеризующий выбираемый теоретический закон рассеяния значений i -го составляющего звена.

Возможное поле рассеяния замыкающего звена при известных полях рассеяния ω_i составляющих звеньев можно рассчитать по формуле

$$\omega_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 \omega_i^2}. \quad (1.3.11)$$

В плоских размерных цепях, имеющих звенья, расположенные под углом к выбранному направлению, каждое из таких звеньев можно заменить его проекцией на это направление. Тем самым любую плоскую размерную цепь можно привести к размерной цепи с параллельно расположенными звеньями.

В качестве примера на рис. 1.3.22 приведена размерная цепь A , в которой звено A_3 находится под углом α относительно направления замыкающего звена B_Δ . Замыкающее звено этой размерной цепи

$$A_\Delta = -A_1 + A_2 + A_3 \cos \alpha - A_4.$$

Как отмечалось, пространственная размерная цепь – это цепь, у которой имеются звенья, расположенные под углом в двух координатных плоскостях. При расчете таких размерных цепей они рассматриваются в трех координатных плоскостях и используют проекции ее звеньев на три направления:

$$A_{ix} = A_i \cos \alpha_i;$$

$$A_{iy} = A_i \cos \beta_i;$$

$$A_{iz} = A_i \cos \lambda_i,$$

где A_{ix} , A_{iy} , A_{iz} – проекции A -го звена на соответствующие координатные оси; α_i , β_i , λ_i – углы между A_i -м звеном и направлением соответствующей координатной оси.

Тригонометрические функции, используемые для получения проекций звеньев на соответствующие направления, выполняют в данном случае роль передаточных отношений, учитывающих одновременно принадлежность звена к числу увеличивающих или уменьшающих звеньев. Поэтому формулы (1.3.1), (1.3.3), (1.3.5) можно использовать и при расчете размерных цепей со звеньями, повернутыми относительно направления замыкающего звена.

Прямая и обратная задачи. При расчете размерных цепей все задачи сводятся к решению прямой или обратной задачи.

При решении прямой задачи исходными данными являются номинальный размер замыкающего звена, его допуск и координата середины поля допуска. В результате расчетов должны быть найдены значения номинальных размеров, их допусков и координат середин полей допусков всех составляющих звеньев размерной цепи.

Прямая задача, как правило, решается конструктором на этапе проектирования изделия. При этом рассчитываются только поля допусков и координаты середин полей допусков. Что касается номинальных размеров, то они уже определены конструкцией изделия, поэтому применяется проверочный расчет, чтобы определить правильность номинальных размеров.

Решение прямой задачи является неопределенным, так как число неизвестных и в уравнении допусков, и в уравнении координат середин полей допусков равно $m - 1$, а для их расчета имеется по одному уравнению (1.3.3) и (1.3.5), что заставляет прибегать к различным способам решения. Одним из таких способов является решение прямой задачи с использованием коэффициентов сложности достижения точности составляющих звеньев.

Коэффициент сложности по своему физическому смыслу выражает возможность достижения уровня точности размера в нормальных производственных условиях без дополнительных затрат и учитывает: трудности обработки поверхности, достижимый уровень точности на оборудовании в исправном состоянии, размер и др.

С помощью коэффициентов сложности определяются допуски на все составляющие звенья, кроме одного, а затем решается уравнение допусков относительно оставшегося составляющего звена.

Например, пусть размерная цепь содержит четыре составляющих звена A_1, A_2, A_3, A_4 ; в исходных данных задан T_Δ замыкающего звена.

Сначала с помощью коэффициентов сложности определяются допуски T_1, T_2 и T_3 . Затем записывается уравнение допусков, где неизвестным будет допуск на звено A_4 , т.е.

$$T_4 = T_\Delta - (T_1 + T_2 + T_3).$$

Аналогично определяются координаты середин полей допусков. Пользуясь системой допусков и посадок, определяются предельные отклонения координаты середины полей допусков всех составляющих звеньев, кроме того же составляющего звена. Затем записывается уравнение середин координат полей допусков относительно координаты середины поля допуска этого звена и, таким образом, рассчитывается ее значение.

Другой способ решения прямой задачи заключается в том, что сначала принимается условие равного влияния допусков всех составляющих звеньев на величину замыкающего звена, т.е. на все составляющие звенья назначается один и тот же допуск, найденный путем деления допуска замыкающего звена на число составляющих звеньев. После этого с учетом коэффициентов сложности корректируются допуски на все составляющие звенья, кроме одного. Затем, записав уравнение допусков относительно допуска оставшегося составляющего звена, находят его значение.

Аналогично рассчитывают координаты середины полей допусков на составляющие звенья.

При решении обратной задачи, исходя из значений номинальных размеров, полей допусков, координат середин полей допусков, предельных отклонений составляющих звеньев, определяют те же характеристики замыкающего звена (в данном случае решением обратной задачи проверяют правильность решения прямой задачи). Если необходимо определить ожидаемую точность замыкающего звена, находят поле рассеяния, координату его середины или границы отклонений замыкающего звена на основании аналогичных данных о составляющих звеньях.

Задача достижения точности замыкающего звена размерной цепи в зависимости от допуска замыкающего звена, конструкции изделия, условий производства может решаться одним из пяти следующих методов: полной взаимозаменяемости, неполной взаимозаменяемости, групповой взаимозаменяемости, регулировки и пригонки.

Метод полной взаимозаменяемости. Сущность его заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи у любого экземпляра изделия достигается при включении в нее или замене в ней любого составляющего звена без выбора, подбора или изменений их величин (например, при сборке 100 соединений «вал-втулка» необходимо обеспечить в каждом соединении заданную величину зазора; при методе полной взаимозаменяемости заданный зазор получится при соединении любой втулки из ста с любым валом).

Простейшим примером применения метода полной взаимозаменяемости является соединение электрической лампы с патроном. Купленная в любом магазине лампа всегда ввернется в любой патрон.

Основными преимуществами метода полной взаимозаменяемости являются:

- 1) простота достижения требуемой точности замыкающего звена. Например, использование этого метода при сборке превращает последнюю в простое соединение деталей;
- 2) простота нормирования процессов во времени, при помощи которых достигается требуемая точность замыкающего звена;
- 3) возможность широкого использования основных преимуществ кооперирования различных цехов и отдельных заводов для изготовления отдельных деталей или сборочных единиц машин (шарикоподшипников, электроаппаратуры, гидронасосов, агрегатных узлов станков, автомобильных моторов и т.д.);
- 4) возможность выполнения технологических процессов рабочими, не обладающими высокой квалификацией.

Недостаток метода полной взаимозаменяемости состоит в том, что допуски на составляющие звенья назначают исходя из обеспечения за-

данной точности замыкающего звена при условии сочетания в размерной цепи составляющих звеньев с крайними значениями.

Например, зазор в соединении « вал–втулка » будет обеспечен, когда диаметр вала будет максимальным в пределах допуска, а диаметр отверстия во втулке будет минимальным, или наоборот, диаметр вала будет минимальным, а диаметр отверстия во втулке будет максимальным.

Однако на практике вероятность сочетания всех составляющих звеньев с крайними значениями в одном изделии невелика, даже в таком простом соединении как "вал–втулка". И чем больше звеньев в размерной цепи, тем меньше вероятность сочетания в одном экземпляре изделия всех составляющих звеньев с крайними значениями. Отсюда следует вывод о том, что применение метода полной взаимозаменяемости приводит к ужесточению допусков на составляющие звенья. При этом ужесточение допусков при одном и том же допуске на замыкающее звено тем выше, чем больше составляющих звеньев. Это следует из формулы расчета величины среднего допуска:

$$T_{cp} = T_{\Delta} / (m - 1) . \quad (1.3.12)$$

Поэтому экономически целесообразной областью использования метода полной взаимозаменяемости являются малозвенные размерные цепи и размерные цепи со сравнительно широким полем допуска замыкающего звена.

Метод неполной взаимозаменяемости. Сущность его заключается в том, что заданная точность замыкающего звена при получении размерной цепи путем включения в нее или замене в ней любого звена без выбора, подбора или изменения их величины достигается не во всех экземплярах изделия.

Отличие рассматриваемого метода от предыдущего заключается в установлении больших по величине допусков на составляющие звенья, что делает изготовление деталей и эксплуатацию машин, которым принадлежат эти звенья, более экономичными. Однако при этом идут на риск получения некоторой доли случаев выхода погрешности замыкающего звена размерной цепи за пределы установленного допуска.

В основе рассматриваемого метода лежит одно из известных положений теории вероятностей, по которому возможные сочетания крайних значений погрешностей всех составляющих размерную цепь звеньев встречаются несравненно реже, чем средних значений. Вследствие этого при значительном расширении допусков составляющих звеньев процент изделий, имеющих выход погрешностей замыкающего звена за пределы требуемого допуска, будет небольшим.

Изложенное можно проиллюстрировать на примере трехзвенной размерной цепи $A_{\Delta} = A_1 - A_2$. Для упрощения задачи допуски составляющих звеньев взяты равными, т.е. $T_{A_1} = T_{A_2}$. Примем, что для обоих составляющих звеньев рассеяние их значений подчиняется закону нормального распределения (закону рассеяния Гаусса). Как известно, при этом условии рассеяние значений замыкающего звена также будет Гауссовым, так как

$$\sigma_{A_{\Delta}} = \sqrt{\sigma_{A_1}^2 + \sigma_{A_2}^2}.$$

Если для решения задачи использовать метод полной взаимозаменяемости, то при требуемом допуске замыкающего звена $T_{A_{\Delta}}$ допуск каждого из составляющих звеньев

$$T_{A_1} = T_{A_2} = \frac{T_{A_{\Delta}}}{m-1} = \frac{T_{A_{\Delta}}}{2}.$$

Изложенное схематически показано на рис. 1.3.25. При решении этой же задачи методом неполной взаимозаменяемости допуски обоих составляющих звеньев, как указано выше, устанавливаются большими, т.е.

$$T'_{A_1} > T_{A_1} \quad \text{и} \quad T'_{A_2} > T_{A_2}.$$

Соответственно и допуск замыкающего звена в этом случае будет больше, чем необходимо, на величину

$$T_{\kappa} = T'_{A_{\Delta}} - T_{A_{\Delta}},$$

где $T'_{A_{\Delta}} = T'_{A_1} + T'_{A_2}$, как это показано на рис. 1.3.25.

Это обстоятельство может вызвать появление некоторой части изделий с погрешностью замыкающего звена, выходящей за пределы требуемого допуска $T_{A_{\Delta}}$ замыкающего звена. Величина этой части изделий определяется отношением суммы двух заштрихованных площадок a и b (рис. 1.3.25) ко всей площади кривой рассеяния замыкающего звена.

Преимущества метода неполной взаимозаменяемости заключаются в том, что задаваясь небольшой величиной риска выхода значений замыкающего звена за пределы допуска, можно существенно расширить допуски составляющих звеньев по сравнению с допусками, назначенными по методу полной взаимозаменяемости.

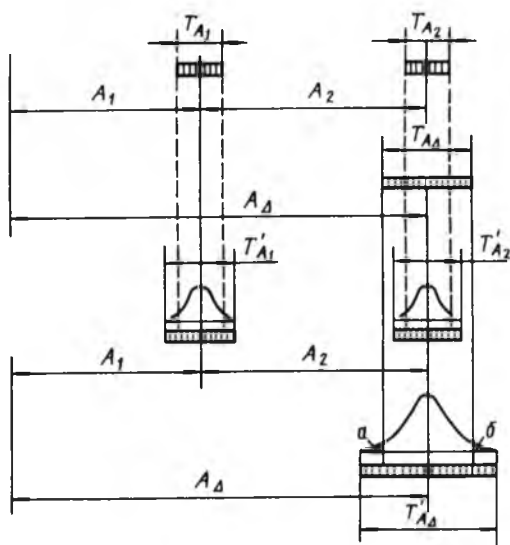


Рис. 1.3.25. Схема достижения точности A_Δ методами полной и неполной взаимозаменяемости

Таким образом, метод неполной взаимозаменяемости не гарантирует получения 100 % изделий с отклонениями замыкающего звена в пределах заданного допуска. Однако дополнительные затраты труда и средств на исправление небольшого числа изделий, размеры которых вышли за пределы допуска, в большинстве случаев малы по сравнению с экономией труда и средств, получаемых при изготовлении изделия, размеры деталей которого имеют более широкие допуски. При сборке изделий дополнительные затраты труда и средств вызываются разборкой изделий с отклонениями замыкающего звена, выходящими за пределы допуска, и возвращением их деталей в тары в расчете на то, что в сочетании с другими деталями эти детали окажутся пригодными для других экземпляров собираемых изделий.

Экономический эффект, получаемый от использования метода неполной взаимозаменяемости вместо метода полной взаимозаменяемости, возрастает по мере повышения требований к точности замыкающего звена и увеличения числа составляющих звеньев в размерной цепи.

Метод групповой взаимозаменяемости. Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена достигается путем включения в размерную цепь составляющих звеньев, принадлежащих к одной из групп, на которые они предварительно рассортированы.

При применении метода групповой взаимозаменяемости поле допуска T_{Δ} замыкающего звена, заданное условиями задачи, увеличивается в целое число n раз для получения экономически эффективного допуска. Расширенное таким образом поле допуска, часто называемое производственным допуском $T'_{\Delta} = nT_{\Delta}$, используют для расчета допусков составляющих звеньев размерной цепи. Детали, изготовленные по таким более широким допускам, в сравнении с методом полной или неполной взаимозаменяемости, сортируют на n групп. Изделия собирают из деталей, принадлежащих только одной из групп, что позволяет достигать точности замыкающего звена в пределах заданного допуска T_{Δ} .

Таким образом, при сборке изделий из деталей одной группы точность замыкающего звена достигается методом полной взаимозаменяемости.

В качестве примера достижения точности замыкающего звена методом групповой взаимозаменяемости вернемся к соединению "вал-втулка". Зная величину допуска $T_{A\Delta}$ на зазор A_{Δ} , расширяют его в n раз, тогда и допуски на составляющие звенья тоже расширятся в n раз. После изготовления валов и втулок их сортируют на n групп и каждой группе присваивается номер.

После изготовления валов и втулок их сортируют по указанным группам и затем собирают вал со втулкой одной группы. В итоге все соединения получаются с зазором в пределах T_{Δ} . Таким образом, применение метода групповой взаимозаменяемости позволяет достигать заданной точности замыкающего звена при экономически выгодных допусках на составляющие звенья.

Этот метод также применяют в случаях, когда имеющееся оборудование не может обеспечить заданную точность деталей, рассчитанную методом неполной взаимозаменяемости.

Однако следует иметь в виду, что применение метода групповой взаимозаменяемости связано с дополнительными затратами труда на сортировку деталей, их клеймение, хранение; в результате усложняется организация производства.

С увеличением числа групп эти расходы увеличиваются и при каком-то числе групп потери эффективности производства превысят положительный эффект. Увеличиваются дополнительные расходы и с увели-

чением числа звеньев в размерной цепи. Поэтому применение метода групповой взаимозаменяемости нашло при достижении точности замыкающего звена у малозвенных размерных цепей.

На практике метод групповой взаимозаменяемости нашел применение для таких изделий, как шарико- и роликоподшипники, соединения пальцев и поршней двигателей и др., где число звеньев в размерной цепи не превышает четырех.

Использование метода групповой взаимозаменяемости требует очень четкой организации измерения, сортировки, хранения, транспортирования и сборки деталей. Малейшая путаница в виде попадания деталей из одной группы в другую исключает возможность получения требуемой точности. Поэтому все рассортированные по группам детали обычно маркируются условными знаками или раскладываются в специальную тару для хранения и перевозки.

Метод пригонки. Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается изменением размера компенсирующего звена путем удаления с него определенного слоя материала. На рис. 1.3.11 (с. 58) показан пример размерной цепи, где точность A_Δ достигается за счет съема припуска кольца с размером A_3 .

При достижении точности замыкающего звена методом пригонки на все составляющие звенья размерной цепи устанавливают целесообразно достижимые (экономичные) в данных производственных условиях величины допусков:

$$T'_1, T'_2, \dots, T'_{m-1}.$$

Если с такими допусками изготовить детали размерной цепи, то погрешность на замыкающем звене выйдет за рамки заданного допуска T_Δ , так как

$$\sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| T'_i = T'_\Delta > T_\Delta.$$

Избыток погрешности на замыкающем звене, наибольшее значение которого называют наибольшей *расчетной величиной компенсации* $\delta_k = T'_\Delta - T_\Delta$, должен быть удален из размерной цепи путем изменения значения заранее выбранного звена, выступающего в роли компенсатора.

При выборе в размерной цепи компенсатора руководствуются следующими соображениями:

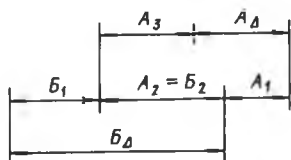


Рис. 1.3.26. Достижение точности A_Δ методом пригонки в параллельно-связанных размерных цепях

цепи в другую. Например, если избрать компенсирующим звеном $A_2 = B_2$ в параллельно связанных размерных цепях (рис. 1.3.26), то, добившись требуемой точности A_Δ за счет изменения значения A_2 , уже нельзя изменить значение B_2 , не нарушая точности A_Δ .

Основным преимуществом метода пригонки является возможность изготовления деталей с экономичными для данных производственных условий допусками. При этом точность замыкающего звена оказывается независимой от точности деталей, она определяется точностью выполнения пригоночных работ и используемых средств контроля. Методом пригонки может быть обеспечена высокая точность замыкающего звена.

Однако пригоночные работы в основном выполняют вручную и требуют высококвалифицированного труда. Сложность пригоночных работ заключается в том, что в их ходе необходимо в комплексе обеспечить точность формы, относительного поворота дополнительно обрабатываемых поверхностей деталей и расстояния между ними. Упущение одного из показателей точности обычно приводит к потере качества изделия.

Существенным недостатком метода пригонки являются значительные колебания затрат времени при выполнении операции пригонки из-за колебания величины компенсации δ_k . Это затрудняет нормирование пригоночных работ и выполнение сборки с установленным тактом. По этой причине пригонку не рекомендуется применять при изготовлении изделий поточными методом.

Экономичной областью использования метода пригонки считается мелкосерийное и единичное производство, хотя не редки случаи, когда метод пригонки из-за своих высоких точностных возможностей оказывается единственно пригодным для обеспечения требуемой точности изделий, производимых в значительных количествах.

— в качестве компенсатора выбирают деталь, изменение размера (являющегося одним из составляющих звеньев) которой при дополнительной обработке требует наименьших затрат;

— недопустимо в качестве компенсатора выбирать деталь, размер которой является общим составляющим звеном параллельно связанных размерных цепей. Нарушение этого условия приводит к возникновению погрешности, "блуждающей" из одной размерной

Метод регулировки. Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается изменением размера компенсирующего звена без удаления материала с компенсатора.

Метод по своей сути не отличается от метода пригонки. Разница заключается лишь в том, что компенсация погрешности на замыкающем звене осуществляется изменением положения компенсирующего звена или его заменой на звено с другим размером. В первом случае компенсатор называют подвижным, во втором – неподвижным. Примером подвижного компенсатора может быть втулка в редукторе (рис. 1.3.27), перемещающую в осевом направлении можно регулировать зазор A_Δ между ее торцом и торцом зубчатого колеса, сидящего на валу. После достижения требуемой точности зазора положение втулки фиксируют стопорным винтом.

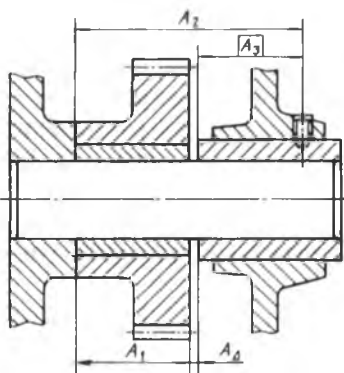


Рис. 1.3.27. Достижение точности A_Δ методом регулировки с подвижным компенсатором

Роль подвижных компенсаторов в машинах могут исполнять специальные устройства, зачастую автоматические.

В качестве неподвижных компенсаторов используют проставочные кольца, прокладки и другие детали несложной конструкции. Если для достижения требуемой точности замыкающего звена A_Δ в конструкции, приведенной на рис. 1.3.11, применить метод регулирования, то в качестве неподвижного компенсатора целесообразно использовать проставочное кольцо (звено A_3). Для подбора компенсатора нужного размера заранее изготавливается группа компенсаторов разных размеров. Обеспечение требуемой точности зазора A_Δ в этом случае сводится к измерению расстояния между торцами зубчатого колеса и бобышки корпуса в предварительно собранном устройстве, к выбору компенсатора надлежащего размера и установке его в устройство при окончательной сборке.

Для метода регулировки характерны следующие преимущества:

1) возможность достижения высокой точности замыкающего звена в многозвенных размерных цепях с экономичными допусками на составляющие звенья;

2) меньшие затраты времени на регулировочные работы по сравнению с пригоночными работами;

3) простота нормирования и организации сборочных работ по сравнению с методом пригонки;

4) возможность автоматического восстановления точности замыкающего звена в процессе эксплуатации изделия.

К недостатку метода регулировки следует отнести необходимость в ряде случаев изменения конструкции изделия путем ввода специальной детали, выступающей в роли компенсатора.

1.3.2.2. Расчет плоских размерных цепей

Методика расчета размерных цепей, расчетные формулы зависят от выбранного метода достижения точности замыкающего звена. В связи с этим ниже излагаются методики расчета размерных цепей по каждому из методов достижения замыкающего звена.

Расчет размерных цепей методом полной взаимозаменяемости. При решении прямой задачи, когда требуется установить допуски на составляющие звенья, исходя из допуска замыкающего звена, должно соблюдаться условие:

$$\sum_{i=1}^{m-1} T_i = T_{\Delta}.$$

Сначала назначают допуски на составляющие звенья одним из способов, изложенных в п. 1.3.2.1. Наиболее часто вначале определяют средний допуск

$$T_{\text{ср}} = T_{\Delta} / m - 1,$$

принимая его за допуск составляющего звена.

Затем для каждого составляющего звена осуществляется корректировка допуска со значением коэффициента сложности его достижения.

Далее проводится проверка правильности назначения допусков путем решения уравнения (1.3.3). Если получится неравенство, то в допуски на составляющие звенья вносят соответствующие коррективы.

Затем определяют координаты середин полей допусков на составляющие звенья, за исключением одного. Решая уравнение (1.3.5) с одним неизвестным, находят координату его середины поля допуска.

При расчете полей допусков и координат их середин часты случаи, когда приходится учитывать ограничения, установленные стандартами и другими нормативными материалами; обязательность их учета не затрагивает существа расчетов и их методической направленности.

Правильность рассчитанных допусков может быть проверена путем определения по установленным значениям полей допусков составляющих звеньев и координат их середин предельных отклонений замыкающего звена и сопоставления их с условиями задачи.

Предельные отклонения замыкающего звена могут быть найдены по следующим формулам:

$$\Delta_{н\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0i} - \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| 0,5 T_i;$$

$$\Delta_{в\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0i} + \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| 0,5 T_i,$$

где $\Delta_{н\Delta}$ — нижнее предельное отклонение замыкающего звена; $\Delta_{в\Delta}$ — верхнее предельное отклонение замыкающего звена.

Рассмотрим пример обеспечения требуемой точности замыкающего звена методом полной взаимозаменяемости.

Задача. Обеспечить зазор между торцами зубчатого колеса и проставочного кольца в механизме (рис. 1.3.11) в пределах 0...0,2 мм.

Замыкающим звеном A_{Δ} является размер, связывающий торцы зубчатого колеса и проставочного кольца; уравнение размерной цепи имеет вид

$$A_{\Delta} = -A_1 + A_2 - A_3$$

Из условий задачи следует, что поле допуска замыкающего звена

$$T_{A_{\Delta}} = \Delta_{вA_{\Delta}} - \Delta_{нA_{\Delta}} = 0,2 - 0 = 0,2 \text{ мм},$$

а координата середины поля допуска замыкающего звена

$$\Delta_{0A_{\Delta}} = 0,5(\Delta_{вA_{\Delta}} + \Delta_{нA_{\Delta}}) = 0,5(0,2 + 0) = +0,1 \text{ мм}.$$

Поскольку размерная цепь является линейной $|\xi_{A_i}| = 1$, то и при назначении допусков на составляющие звенья необходимо соблюдение условия

$$\sum_{i=1}^{m-1} T_{A_i} = T_{A_\Delta}.$$

При назначении допусков на составляющие звенья надо учитывать степень сложности достижения их точности в процессе изготовления.

Из трех составляющих звеньев наиболее сложно достигается точность звена A_2 , так как этот размер является наибольшим по величине, кроме того, доступ к нему затруднен и поэтому обработка поверхностей производится консольным инструментом.

Легче обеспечить точность размеров A_1 и A_3 ; из них проще достигается точность размера A_3 . Учитывая изложенное, примем

$$T_{A_1} = 0,03 \text{ мм}, T_{A_2} = 0,15 \text{ мм}, T_{A_3} = 0,02 \text{ мм}$$

и координаты середин полей допусков

$$\Delta_{0A_1} = -0,015 \text{ мм}, \Delta_{0A_2} = 0,075 \text{ мм}.$$

Координату середины поля допуска третьего звена находим из уравнения $\Delta_{0A_\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} \Delta_{0A_i} = -\Delta_{0A_1} + \Delta_{0A_2} - \Delta_{0A_3}$, где неизвестным является Δ_{0A_3} ; тогда $0,1 = 0,015 + 0,075 - \Delta_{0A_3}$.

Решая последнее уравнение относительно Δ_{0A_3} , получим $\Delta_{0A_3} = -0,01 \text{ мм}$. Правильность назначения допусков проверяется через определение предельных отклонений замыкающего звена:

$$\begin{aligned} \Delta_{н\Delta} &= \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} \Delta_{0A_i} - \sum_{i=1}^{m-1} 0,5 T_{A_i} = \\ &= (0,015 + 0,075 + 0,01) - 0,5 (0,03 + 0,15 + 0,02) = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{в\Delta} &= \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} \Delta_{0A_i} + \sum_{i=1}^{m-1} 0,5 T_{A_i} = \\ &= (0,015 + 0,075 + 0,01) + 0,5 (0,03 + 0,15 + 0,02) = 0,2 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Сопоставление с условиями задачи показывает, что допуски установлены правильно.

Расчет размерных цепей методом неполной взаимозаменяемости. При расчете допусков по методу неполной взаимозаменяемости используют уравнение (1.3.10) на с. 56.

Исходным для решения прямой задачи является величина допуска замыкающего звена и допустимая доля риска P (в %) выхода замыкающего звена в партии изделий за пределы поля допуска.

Выбор величины P обосновывается технико-экономическим расчетом. Например, для партии изделий необходимо учесть затраты на изготовление деталей и сборку изделий в количестве, соответствующем доле P , и сопоставить с общей выгодой, которую дает расширение допусков на составляющие звенья при изготовлении деталей и сборке изделий.

Расчет начинается с установления среднего допуска на составляющие звенья с помощью уравнения

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\Delta}}{t_{\Delta} \sqrt{\lambda'_{\text{ср}} (m-1)}}. \quad (1.3.13)$$

Зная величины T , m и P , определяем коэффициент риска t и коэффициент λ'_i , характеризующий закон рассеяния отклонений i -го составляющего звена, после чего определяется значение $\lambda'_{\text{ср}}$ как среднеарифметическое значение λ' всех составляющих звеньев.

Значение коэффициента риска t_{Δ} выбирают из таблиц значений функции $\Phi(t_{\Delta})$ Лапласа в зависимости от принятого риска P (в %). При нормальном законе распределения отклонений и равновероятном их выходе за обе границы поля допуска

$$P = 100 [1 - 2\Phi(t)].$$

Некоторые значения коэффициента t приведены ниже:

Риск P , %	32,00	10,00	4,50	1,00	0,27	0,10	0,01
Коэффициент t	1,00	1,65	2,00	2,57	3,00	3,29	3,89

Значения λ_i устанавливаются с учетом возможных условий, в которых будут протекать технологические процессы.

Наиболее распространенными законами, которым подчинено рассеяние отклонений, являются:

- нормальный закон (закон Гаусса), $\lambda_i^2 = 1/9$;
- закон Симпсона (закон треугольника), $\lambda_i^2 = 1/6$;
- закон равной вероятности, $\lambda_i^2 = 1/3$.

Наиболее вероятным в условиях массового и крупносерийного производства является нормальный закон рассеяния отклонений составляющих звеньев. В тех случаях, когда трудно предвидеть законы распределения отклонений составляющих звеньев размерной цепи, принимают закон Симпсона или закон равной вероятности. При этом следует иметь в виду, что несоответствие фактических законов распределения, принятых в расчете, может повлечь за собой большую долю выхода отклонения замыкающего звена за пределы установленного допуска.

После определения величины среднего допуска производится его корректировка по каждому составляющему звену размерной цепи с учетом сложности достижения его точности. Затем правильность назначенных допусков на составляющие звенья проверяется по формуле (1.3.10).

Координаты середин полей допусков рассчитывают по формуле (1.3.5) так же, как и при методе полной взаимозаменяемости; эти формулы являются общими для всех пяти методов достижения требуемой точности замыкающего звена.

Правильность установленных допусков может быть проверена сопоставлением предельных отклонений замыкающего звена с заданными его значениями:

$$\Delta_{н\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0i} - t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 (0,5T)^2}; \quad (1.3.14)$$

$$\Delta_{в\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0i} + t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 (0,5T)^2}. \quad (1.3.15)$$

Для иллюстрации методики расчета допусков при достижении требуемой точности замыкающего звена методом неполной взаимозаменяемости возьмем ранее рассмотренный пример (см. рис. 1.3.11), полностью сохранив условия задачи.

Итак, $T_{A_{\Delta}} = 0,2$ мм, $T_{0A_{\Delta}} = +0,1$ мм. Зададим значение коэффициента риска $t_{A_{\Delta}}$, считая экономически оправданным $P = 1\%$. Такой доле риска соответствует $t_{A_{\Delta}} = 2,57$.

Примем, что распределение отклонений составляющих звеньев будет близким к закону Гаусса, тогда $\lambda_{A_i}^2 = 1/9$.

Учитывая трудности достижения требуемой точности каждого составляющего звена и используя формулу (1.3.10), примем следующие значения полей допусков:

$$T_{A_1} = 0,1 \text{ мм}; \quad T_{A_2} = 0,20 \text{ мм}; \quad T_{A_3} = 0,06 \text{ мм}.$$

При этих значениях T_{A_i}

$$\Delta_{A_\Delta} = t_\Delta \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i}^2 \lambda_{A_i}^2 T_{A_i}^2} = 2,57 \sqrt{\frac{1}{9}(0,1^2 + 0,2^2 + 0,06^2)} = 0,2 \text{ мм}.$$

Для двух составляющих звеньев установим следующие значения координат середин полей допусков: $\Delta_{0A_1} = 0$, $\Delta_{0A_2} = 0,1$ мм. Значение Δ_{0A_3} найдем из уравнения: $\Delta_{0A_\Delta} = \Delta_{0A_1} + \Delta_{0A_2} + \Delta_{0A_3}$, т.е. $0,1 = 0 + 0,1 - \Delta_{0A_3}$.

В результате получим $\Delta_{0A_3} = 0$.

Правильность установленных допусков проверяется по формулам (1.3.14) и (1.3.15). Используя их, определяем

$$\begin{aligned} \Delta_{нA_\Delta} &= \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} \Delta_{0A_i} - t_{A_\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i}^2 \lambda_{A_i}^2 \left(\frac{T_{A_i}}{2}\right)^2} = \\ &= (0 + 0,1 - 0) - 2,57 \sqrt{\frac{1}{9} \left(\frac{0,1^2 + 0,2^2 + 0,06^2}{4} \right)} = 0,1 - 0,1 = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{нA_\Delta} &= \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} \Delta_{0A_i} + t_{A_\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i}^2 \lambda_{A_i}^2 \left(\frac{T_{A_i}}{2}\right)^2} = \\ &= (0 + 0,1 - 0) + 2,57 \sqrt{\frac{1}{9} \left(\frac{0,1^2 + 0,2^2 + 0,06^2}{4} \right)} = 0,1 + 0,1 = 0,2. \end{aligned}$$

Представляют интерес для выбора одного из двух методов достижения точности данные, приведенные в табл. 1.3.1 и 1.3.2.

Таблица 1.3.1

Звено	T_{A_i} при расчете по методам взаимозаменяемости		Увеличение T_{A_i}
	полной	неполной*	
A_1	0,03	0,10	3,33
A_2	0,15	0,20	1,33
A_3	0,02	0,06	3,00

* Риск $P = 1 \%$.

Таблица 1.3.2

Риск, %	λ'_{cp}	R	Риск, %	λ'_{cp}	R
0,27	1/3	1,41	1	1/3	1,65
	1/6	2		1/6	2,35
	1/9	2,45		1/9	2,85

В табл. 1.3.1 приведено сопоставление степени увеличения допусков, рассчитанных методом полной взаимозаменяемости, по сравнению с методом неполной взаимозаменяемости. В табл. 1.3.2 показано увеличение среднего значения допуска R в зависимости от λ'_{cp} .

Рассмотренные данные иллюстрируют основное преимущество метода неполной взаимозаменяемости – возможность установления значительно больших допусков на составляющие звенья размерной цепи по сравнению с допусками при использовании метода полной взаимозаменяемости, что упрощает и делает более экономичным изготовление деталей.

При использовании метода неполной взаимозаменяемости для одновременного решения нескольких задач у одного и того же изделия или на одном и том же объекте необходимо учитывать, что общий риск может быть больше любого из частных значений риска, принятых при расчете допусков для каждой из размерных цепей.

Действительно, если приняты следующие значения риска (в долях единицы): q_1 – для первой, q_2 – для второй, ..., q_s – для s -й размерной цепи, то на основании теоремы об умножении вероятностей общий риск будет

$$Q_{(s)} = 100 [1 - (1 - q_1)(1 - q_2) \dots (1 - q_s)]\% = 100 \left[1 - \prod_{i=1}^s (1 - q_i) \right]\%.$$

Например, при одновременном использовании метода неполной взаимозаменяемости для достижения точности в трех размерных цепях изделия или объекта общая величина риска

$$Q_3 = 100[(q_1 + q_2 + q_3) - (q_1 q_2 + q_1 q_3 + q_2 q_3) + q_1 q_2 q_3]\%.$$

При решении обратной задачи, когда известны поля и законы рассеяния составляющих звеньев и координаты их середин полей рассеяния, надо определить возможную величину поля рассеяния замыкающего звена и долю выхода (в %) его значений за пределы установленного допуска у партии изделий.

Расчет возможной величины поля рассеяния замыкающего звена проводится с помощью уравнения (1.3.11).

Расчет P осуществляется следующим образом: сначала решается уравнение

$$t_{\Delta} = \frac{T_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 \omega_i^2}},$$

после по величине t_{Δ} устанавливается величина P .

Расчет размерных цепей методом групповой взаимозаменяемости. Расчет начинается с определения T_{cp} по методу полной взаимозаменяемости. Величина T_{cp} позволяет оценить уровень точности составляющих звеньев и сопоставить с возможностями производства по его достижению.

На основе этого определяют величину расширения n для получения производственного допуска T'_{Δ} ,

$$T'_{\Delta} = n T_{\Delta}.$$

Далее распределяют величину T'_{Δ} по составляющим звеньям из тех же соображений, что и при расчете методами полной и неполной взаимозаменяемости.

Рассмотрим метод групповой взаимозаменяемости на примере трехзвенной размерной цепи, поскольку любую многозвенную размерную цепь можно привести к трехзвенной размерной цепи.

Чтобы все изделия после групповой сборки правильно выполняли свое служебное назначение, средняя величина зазора или натяга в соединениях каждой группы должна быть одинаковой. Это достигается выпол-

нением следующего условия: сумма полей допусков увеличивающих звеньев должна быть равна сумме полей допусков уменьшающих звеньев, т.е.

$$\sum_{i=1}^k |\xi_i| \bar{T}_i' = \sum_{k+1}^{m-1} |\xi_i| \bar{T}_i',$$

где k – количество увеличивающих звеньев.

Увеличение допусков увеличивающих и уменьшающих звеньев должно осуществляться в таких направлениях, чтобы сохранялась координата середины поля допуска замыкающего звена. У рассматриваемой трехзвенной размерной цепи одно составляющее звено является увеличивающим, а другое – уменьшающим.

Как следует из рис. 1.3.28, а, замыкающим звеном размерной цепи является зазор, координата середины поля допуска которого равна $\Delta_{0\Delta}$.

На рис. 1.3.28, б показаны расширенные в 3 раза в разных направлениях поля допусков составляющих звеньев. Из схемы следует, что с увеличением номера группы растет и координата середины поля допуска $\Delta_{0\Delta}$ ($\Delta_{0\Delta_1} < \Delta_{0\Delta_2} < \Delta_{0\Delta_3}$), а, следовательно, будет расти и зазор, который должен быть неизменным.

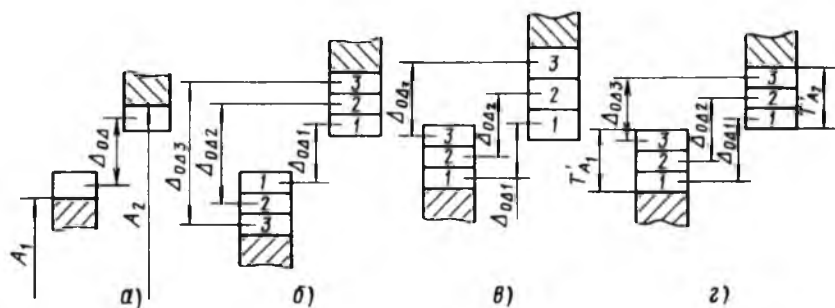


Рис. 1.3.28. Схемы расположения полей допуска при использовании метода групповой взаимозаменяемости:

а – заданное расположение; б – при расширенных допусках в разных направлениях; в – при расширенных допусках в одном направлении

в условиях $\vec{\Sigma T} \neq \overleftarrow{\Sigma T}$; з – при расширенных допусках

в одном направлении в условиях $\vec{\Sigma T} = \overleftarrow{\Sigma T}$

На рис. 1.3.28, *в* показана схема с одинаковым направлением расширения полей допусков составляющих звеньев. Но и в этом случае с повышением номера группы растет величина $\Delta_{0\Delta}$ (хотя и в меньшей степени), так как не выполнено условие равенства допусков увеличивающих и уменьшающих звеньев.

На рис. 1.3.28, *г* приведена схема расположения полей допусков групп, где выполнены оба условия. В результате с увеличением номера группы координата середины поля допуска замыкающего звена остается постоянной.

При использовании метода групповой взаимозаменяемости следует помнить о дополнительных расходах на измерение, сортировку, клеймение и хранение деталей. С ростом числа групп эти расходы возрастают, поэтому при применении метода групповой взаимозаменяемости надо стремиться к тому, чтобы число групп было по возможности наименьшим.

Следует иметь в виду и то обстоятельство, что допуски на отклонения геометрической формы и поворота поверхностей в группах должны соответствовать не производственному допуску T'_Δ , а заданному допуску T_Δ . Если это условие не будет соблюдено, то у изделий замыкающее звено может выйти за пределы заданного допуска.

Объясняется это тем, что сортировка деталей на группы производится только по размеру. Поэтому, если допустить, что отклонения формы и поворота составляют 50 % от погрешности размера, то при расширении допуска последнего, например в 3 раза, возрастут примерно в 3 раза и погрешности формы и поворота. В итоге погрешность формы и поворота превысит допуск на размер в группе.

Пример расчета зазора A_Δ (рис. 1.3.11) методом групповой взаимозаменяемости. Условия задачи: $T_{A_\Delta} = 0,2$ мм; $\Delta_{0A_\Delta} = +0,1$ мм;

$$A_\Delta = -\bar{A}_1 + \bar{A}_2 - \bar{A}_3.$$

Установим производственный допуск замыкающего звена и число групп, на которые должны быть рассортированы детали после изготовления. Допустим, что расширение допуска T_{A_Δ} в 3 раза в данном случае является экономически обоснованным, в связи с чем число групп примем $n = 3$. Таким образом, $T'_{A_\Delta} = 3 T_{A_\Delta} = 3 \cdot 0,2 = 0,6$ мм.

При расчете полей допусков должно быть соблюдено условие

$$\sum_{i=1}^k |\xi_i| \bar{T}'_{A_i} = \sum_{k+1}^{m-1} |\xi_{A_i}| \bar{T}'_{A_i}.$$

Согласно этому условию

$$T'_{A_2} = T'_{A_1} + T'_{A_3} = 0,5 T'_{A_\Delta}.$$

Отсюда $T'_{A_2} = 0,5 T'_{A_\Delta} = 0,3$ мм и $T'_{A_1} + T'_{A_3} = 0,5 T'_{A_\Delta} = 0,3$ мм.

Сообразно степени сложности изготовления деталей зададим $T'_{A_1} = 0,24$ мм и $T'_{A_3} = 0,06$ мм.

Установим значения полей допусков и координат их середин для деталей каждой группы (табл. 1.3.3). При расчете координат середин полей допусков первой группы было использовано уравнение для T'_{A_1} .

$$\Delta_{0A_\Delta} = -\Delta_{0A_1} + \Delta_{0A_2} - \Delta_{0A_3}.$$

Координаты середины полей допусков каждой следующей группы получены путем увеличения координат предшествующей группы на соответствующие поля допусков. Две последние колонки таблицы (T'_{A_Δ} и Δ_{0A_Δ}) показывают, что при соединении деталей в каждой группе точность замыкающего звена будет отвечать условиям задачи.

Предельные отклонения составляющих звеньев приведены в табл. 1.3.4.

Таблица 1.3.3

Группа	T'_{A_1}	Δ_{0A_1}	T'_{A_2}	Δ_{0A_2}	T'_{A_3}	Δ_{0A_3}	T'_{A_Δ}	Δ_{0A_Δ}
I	0,08	-0,04	0,1	+0,05	0,02	-0,01	0,2	+0,1
II	0,08	+0,04	0,1	+0,15	0,02	+0,01	0,2	+0,1
III	0,08	+0,12	0,1	+0,25	0,02	+0,03	0,2	+0,1

Таблица 1.3.4

Группа	A_1	A_2	A_3
I	0	+0,1	0
	-0,08	0	-0,02
II	+0,08	+0,2	+0,02
	0	+0,1	0
III	+0,16	+0,3	+0,04
	+0,08	+0,2	+0,02

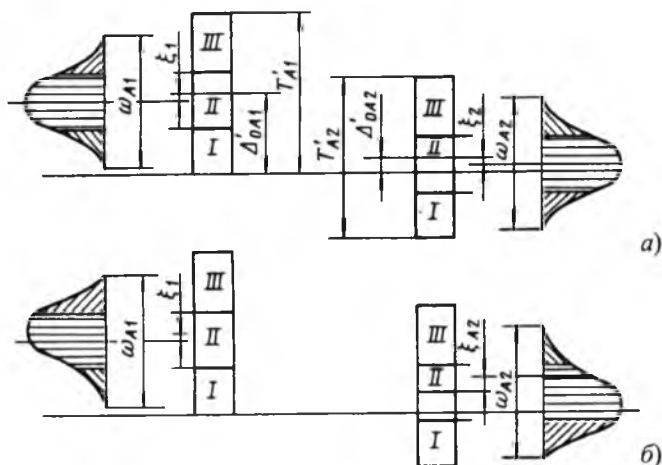


Рис. 1.3.29. Влияние формы и расположения кривых рассеяния на собираемость изделий:

а — при одинаковых кривых рассеяния и равенстве величины и знаков смещения ξ_i середин полей рассеяния; *б* — при разных кривых рассеяния и неравенстве величины и знаков смещения ξ_i координат середин полей рассеяния

Одним из существенных условий экономичного использования метода групповой взаимозаменяемости является соблюдение у составляющих звеньев идентичности законов рассеяния и равенства величины и знаков смещения ξ середин полей рассеяния относительно середин полей допусков. Только при соблюдении этих условий будет обеспечиваться комплектность изделий (рис. 1.3.29, *а*), не будет избытка одних и нехватки других деталей в группах, т.е. как в случае, показанном на рис. 1.3.29, *б*.

Расчет размерных цепей методом пригонки. При достижении точности замыкающего звена методом пригонки вначале на все составляющие звенья размерной цепи устанавливаются экономичные для данных производственных условий допуски $T'_1, T'_2 \dots T'_{m-1}$.

Затем рассчитывается величина компенсации δ_k

$$\delta_k = T'_\Delta - T_\Delta,$$

которая должна быть удалена с компенсирующего звена.

Далее должны быть назначены координаты середин полей допусков составляющих звеньев.

Произвольное назначение координат середин полей допусков составляющих звеньев может привести к тому, что у компенсатора не окажется нужного запаса материала для пригонки. Для того чтобы обеспечить на компенсаторе минимально необходимый слой материала (припуск) для пригонки, и в то же время достаточный для устранения максимального отклонения замыкающего звена, в координату середины поля допуска компенсирующего звена необходимо ввести поправку Δ_k .

Пусть в трехзвенной размерной цепи A (рис. 1.3.30) требуемая точность замыкающего звена характеризуется величинами $T_{A\Delta}$ и $\Delta_{0A\Delta}$; T'_{A_1} и T'_2 – поля допусков составляющих звеньев, экономически целесообразные для данных производственных условий; Δ'_{0A_1} и Δ'_{0A_2} – координаты середин полей расширенных допусков.

При этих допусках отклонения замыкающего звена A_Δ возможны в пределах $T'_{A\Delta}$ при координате середины полей допуска $\Delta'_{0A\Delta}$. Наибольшее возможное отклонение A_Δ отстоит от верхней границы $T_{A\Delta}$ на величину Δ_k , значение которой может быть определено следующим путем:

$$\Delta'_{BA\Delta} = \Delta_{BA\Delta} + \Delta_k;$$

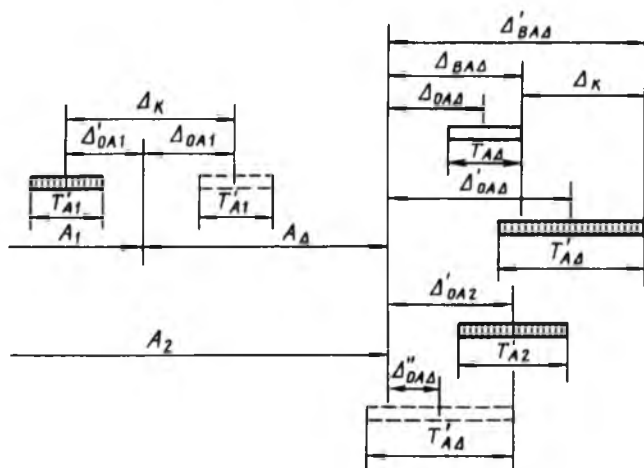


Рис. 1.3.30. Схема определения направления Δ_k

$$\Delta'_{0A_\Delta} + 0,5T'_{A_\Delta} = \Delta_{0A_\Delta} + 0,5T_{A_\Delta} + \Delta_\kappa;$$

$$\Delta_\kappa = 0,5(T'_{A_\Delta} - T_{A_\Delta}) + \Delta'_{0A_\Delta} - \Delta_{0A_\Delta}.$$

$$\text{Отсюда } \Delta_\kappa = 0,5\delta_\kappa + \Delta'_{0A_\Delta} - \Delta_{0A_\Delta}.$$

Если в качестве компенсирующего выбрать уменьшающее составляющее звено A_1 , то для обеспечения необходимого припуска на пригонку надо в координату Δ_{0A_1} ввести поправку Δ_κ , придав T'_{A_1} положение, показанное на рисунке штриховыми линиями и характеризующее координатой Δ'_{0A_1} . Новое значение координаты Δ'_{0A_1} изменит положение T'_{A_Δ} , приведет к совмещению его верхней границы с верхней границей T_{A_Δ} и обеспечит минимальный припуск на пригонку.

Обобщая рассмотренный случай и распространяя выводы на размерные цепи с любым числом составляющих звеньев, можно записать:

$$\Delta_\kappa = 0,5\delta_\kappa + \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta'_{0i} - \Delta_{0A_\Delta}.$$

Отметим, что для устранения недостатка или излишка припуска на компенсирующем звене, если оно уменьшающее, поправку Δ_κ вносят в координату середины его поля допуска со своим знаком. Если компенсирующим является увеличивающее звено, то поправку Δ_κ вносят в координату середины его поля допуска со знаком, обратным полученному при вычислении.

Пример расчета зазора A_Δ (рис. 1.3.11) методом пригонки. Примем в качестве компенсирующего звена толщину A_3 проставочного кольца.

Установим на составляющие звенья экономически целесообразные поля допусков и зададим координаты, мм, середин полей допусков:

Звено	$-A_1$	A_2	$-A_3$
T'_{A_1}	0,3	0,4	0,1
Δ'_{0A_1}	-0,15	+0,20	+0,25

При этих значениях T'_{A_1} допуск замыкающего звена будет равен

$$T'_{A_\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} T'_{A_i} = 0,3 + 0,4 + 0,1 = 0,8 \text{ мм.}$$

Наибольшая возможная компенсация

$$\delta_k = T'_{A_\Delta} - T_{A_\Delta} = 0,8 - 0,2 = 0,6 \text{ мм.}$$

Для того чтобы компенсатор имел необходимую для пригонки толщину, в координату середины поля допуска звена A_3 следует ввести поправку

$$\Delta_k = 0,5\delta_k + \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} \Delta'_{0A_i} - \Delta_{0A_\Delta} = 0,5 \cdot 0,6 + (0,15 + 0,2 - 0,25) - 0,1 = 0,3 \text{ мм.}$$

Поскольку компенсирующим является уменьшающее составляющее звено, то поправка Δ_k должна быть введена в координату середины его поля допуска со своим знаком. Отсюда

$$T'_{0A_i} = 0,25 + 0,3 = 0,55 \text{ мм.}$$

Расчет размерных цепей методом регулировки. Принципиально метод аналогичен методу пригонки, различие заключается лишь в способе изменения размера компенсирующего звена.

В отличие от метода пригонки методом регулировки достаточно просто можно решать задачи придания требуемого углового положения детали в машине. На рис. 1.3.31 приведена конструкция, позволяющая обеспечивать методом регулировки параллельность оси вала в горизонтальной и в одной из вертикальных координатных плоскостей. Вал устанавливают в средней опоре, а затем на его концах монтируют крайние опоры. Имея возможность перемещаться в направлении осей X и Z , крайние опоры 1 и 2 выполняют роль подвижных компенсаторов. Перемещая их, добиваются требуемой параллельности оси вала в

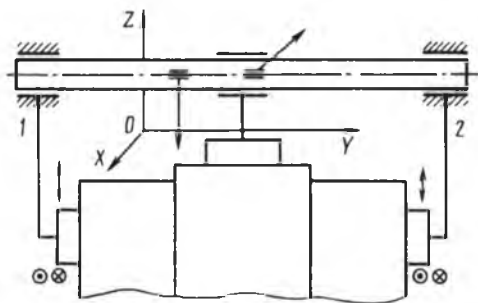


Рис. 1.3.31. Схема достижения параллельности оси вала основанию с помощью подвижных компенсаторов:

1 и 2 – опоры

плоскостях XOY и YOZ , а затем положение опор фиксируется крепежными винтами и контрольными штифтами.

Допуски при методе регулирования назначают так же, как при методе пригонки: устанавливают экономически приемлемые для данных производственных условий поля допусков $T'_1, T'_2, \dots, T'_{m-1}$ и координаты $\Delta'_{01}, \Delta'_{02}, \dots, \Delta'_{0m-1}$ их середин.

При применении подвижного компенсатора определяют δ_k , которую учитывают при разработке конструкции подвижного компенсатора и определении его размера.

При применении неподвижного компенсатора приходится считаться с тем, что неподвижный компенсатор не в состоянии скомпенсировать собственное отклонение. Поэтому в проводимых расчетах допуск, ограничивающий отклонения компенсирующего звена, учитывать нельзя:

$$T_{\Delta}'' = \sum_{i=1}^{m-2} |\xi_i| T'_i; \quad \Delta_{0\Delta}'' = \sum_{i=1}^{m-2} \xi_i \Delta'_{0i},$$

где $m-2$ означает, что при суммировании значения T'_k и Δ'_{0k} компенсатора не учтены. Следовательно,

$$\delta_k = T_{\Delta}'' - T_{\Delta}.$$

Далее необходимо определить число ступеней компенсаторов и их размеры. Число ступеней компенсаторов

$$N = T_{\Delta}'' / (T'_{\Delta} - T'_k),$$

где T'_k — поле допуска, ограничивающее отклонения размера компенсатора.

Для пояснения подхода к определению размеров компенсаторов каждой ступени воспользуемся задачей, рассмотренной ранее (см. рис. 1.3.11).

В качестве неподвижного компенсатора выступает проставочное кольцо A_3 , а $T_{A_{\Delta}}$ и $\Delta_{0A_{\Delta}}$ — соответственно поле допуска и координата середины поля допуска замыкающего звена A_{Δ} , где $T_{A_{\Delta}} = 0,2$ мм, $\Delta_{0A_{\Delta}} = 0,1$ мм.

Произвольный выбор координат Δ'_{0A_i} середин полей допусков $(m-2)$ составляющих звеньев может привести к расположению допуска $T_{A_{\Delta}}''$

относительно допуска $T_{A\Delta}$, неудобному для определения размеров компенсаторов (например, к положению, показанному на рис. 1.3.32 штриховыми линиями). Значительно проще определять размеры компенсаторов, имея совмещенные верхние или нижние границы допусков $T''_{A\Delta}$ и $T_{A\Delta}$.

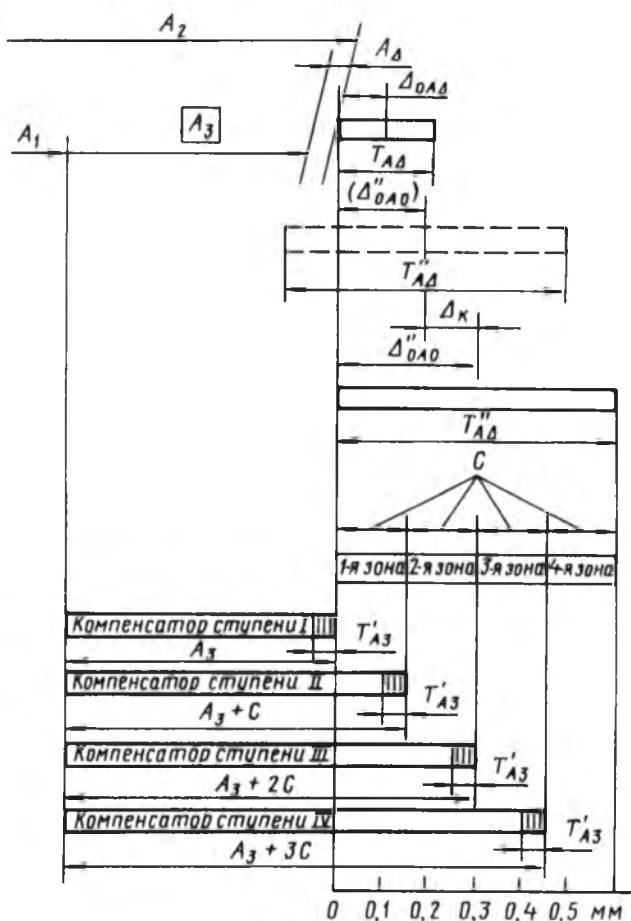


Рис. 1.3.32. Схема определения размеров ступеней компенсатора

Для совмещения одноименных границ полей допусков необходимо: 1) либо (при установленных значениях Δ'_{0A_i}) ввести поправку Δ'_k в координату середины поля допуска одного из составляющих звеньев, но не компенсирующего звена; 2) либо не устанавливать заранее значения Δ'_{0A_i} , а рассчитать их, исходя, например, из условия $\Delta''_{нA_\Delta} = \Delta_{нA_\Delta}$.

Следуя первым путем и желая совместить нижние границы полей допусков, в координату середины поля допуска одного из составляющих звеньев необходимо внести поправку

$$\Delta'_k = 0,5\delta_k - \sum_{i=1}^{m-2} \xi_i \Delta'_{0i} + \Delta'_{0A_\Delta}.$$

Избрав второй путь и соблюдая условие $\Delta''_{нA_\Delta} = \Delta_{нA_\Delta}$, будем иметь $\Delta'_{0A_\Delta} - 0,5T''_{A_\Delta} = \Delta_{нA_\Delta}$.

Отсюда величина $\Delta'_{0A_\Delta} = \Delta_{нA_\Delta} + 0,5T''_{A_\Delta}$ оказывается известной, поскольку значение $\Delta_{нA_\Delta}$ задано условиями задачи, а значение T''_{A_Δ} было определено ранее. Далее обычным путем, составив уравнение координат полей допусков, на основании зависимости

$$\Delta'_{0A_\Delta} = \sum_{i=1}^k \bar{\Delta}_{0i} - \sum_{k+1}^{m-2} \bar{\Delta}_{0i}$$

следует установить координаты средин полей допусков $(m-2)$ составляющих звеньев.

Координату середины поля допуска компенсирующего звена устанавливают независимо от координат других составляющих звеньев. Для упрощения расчета размеров ступеней компенсатора рекомендуется задавать координату середины поля допуска компенсирующего звена, равную половине его поля допуска со знаком минус, т.е. направлять допуск в «тело» компенсатора.

Упорядочив или рассчитав значения координат средин полей допусков и придав T''_{A_Δ} удобное положение, можно установить размеры ступеней компенсатора.

Размер компенсатора первой ступени равен номинальному размеру компенсатора. Размер компенсаторов каждой следующей ступени будет

отличаться от размера компенсатора предшествующей ступени на значение C ступени компенсации:

$$C = T_{A_{\Delta}} - T'_K.$$

Допуск, ограничивающий отклонения компенсирующего звена, остается одним и тем же для компенсаторов всех ступеней.

На схеме, показанной на рис. 1.3.32, видно, как осуществляется компенсация отклонений, находящихся в четырех зонах $T''_{A_{\Delta}}$, компенсаторами четырех ступеней.

Пример. Зададим поля допусков, считающиеся экономичными в заданных условиях: $T'_{A_1} = 0,2$ мм, $T'_{A_2} = 0,4$ мм, $T'_{A_3} = 0,05$ мм (рис. 1.3.11).

Поскольку в размерной цепи A компенсирующим является звено A_3 , то компенсации подлежат отклонения звеньев A_1 и A_2 . В соответствии с этим

$$T''_{A_{\Delta}} = \sum_{i=1}^{m-2} |\xi_{A_i}| T_{A_i} = 0,2 + 0,4 = 0,6 \text{ мм};$$

$$\delta_K = T''_{A_{\Delta}} - T_{A_{\Delta}} = 0,6 - 0,2 = 0,4 \text{ мм}.$$

Число ступеней компенсаторов

$$N = T''_{A_{\Delta}} / (T'_{A_{\Delta}} - T'_K) = 0,6 / (0,2 - 0,05) = 4.$$

Рассчитаем координаты середин полей допусков, соблюдая условие $\Delta''_{nA_{\Delta}} = \Delta_{nA_{\Delta}}$.

$$\Delta_{nA_{\Delta}} = \Delta''_{0A_{\Delta}} - 0,5 T''_{A_{\Delta}}.$$

Отсюда $\Delta''_{0A_{\Delta}} = \Delta_{nA_{\Delta}} + 0,5 T''_{A_{\Delta}} = 0 + 0,5 \cdot 0,6 = 0,3$ мм.

Таким образом, $\Delta''_{0A_{\Delta}} = -\Delta'_{0A_1} + \Delta'_{0A_2} = 0,3$ мм. Установим $\Delta'_{0A_1} = -0,1$ мм и $\Delta'_{0A_2} = 0,2$ мм.

Независимо от Δ'_{0A_1} и Δ'_{0A_2} координата середины поля допуска компенсирующего звена

$$\Delta'_{0A_3} = -0,5 T''_{A_3} = 0,5 \cdot 0,05 = -0,025 \text{ мм}.$$

При ступени компенсации $C = T_{A_{\Delta}} - T'_{A_3} = 0,2 - 0,05 = 0,15$ мм поле $T''_{A_{\Delta}}$ производственного допуска окажется разделенным на четыре зоны.

Отклонения, возникающие в пределах той или иной зоны, должны компенсироваться путем установки проставочного кольца соответствующей ступени.

Размер компенсаторов первой ступени равен номинальному размеру A_3 . Размеры компенсаторов каждой следующей ступени будут отличаться от предшествующей на величину C .

С учетом допуска на изготовление размеры компенсаторов будут следующими (в мм):

$$\text{ступень I} - A_3 - 0,05;$$

$$\text{ступень II} - (A_3 + 0,15) - 0,05;$$

$$\text{ступень III} - (A_3 + 0,30) - 0,05;$$

$$\text{ступень IV} - (A_3 + 0,45) - 0,05;$$

Разницу в номиналах целесообразно учесть в предельных отклонениях и установить такие размеры компенсаторов (в мм):

$$\text{ступень I} - A_3 - 0,05; \text{ ступень II} - A_3^{+0,15}_{+0,10};$$

$$\text{ступень III} - A_3^{+0,30}_{+0,25}; \text{ ступень IV} - A_3^{+0,45}_{+0,40}.$$

Число неподвижных компенсаторов в каждой ступени делают одинаковым, если нет данных о законе рассеяния отклонений звена в размерной цепи. Если же такие данные есть, то число компенсаторов каждой ступени должно быть пропорциональным соответствующим площадям участков кривой рассеяния, построенной относительно T''_{A_0} , как это показано на рис. 1.3.33 для закона нормального распределения.

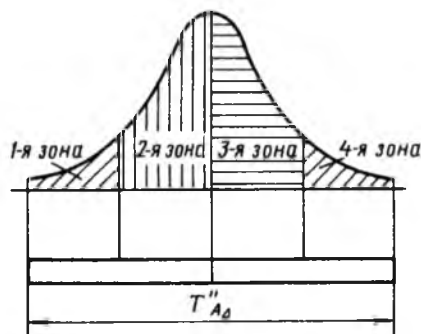


Рис. 1.3.33. Определение числа компенсаторов каждой ступени

1.3.2.3. Пространственные размерные цепи

Главный недостаток расчета плоских размерных цепей заключается в том, что линейные и угловые размерные цепи строятся как независимые и их расчет ведется независимо друг от друга [2]. В то же время деталь представляет собой совокупность поверхностей, образующих единое пространственное тело. Поэтому назначение допусков на расстояния и повороты поверхностей как на независимые величины, т.е. без их взаимного согласования, приводит к значительным ошибкам.

Ошибки начинаются уже с неточностей определения положения размеров. Например, показывая на чертеже детали (рис. 1.3.34, а), что плоскость *Б* должна быть параллельна плоскости *А*, не указываются координаты точки поворота плоскости *Б* и направление поворота. В результате при таком задании допуска на отклонение от параллельности возможны различные варианты фактического положения плоскости *Б* в пределах, заданных допуском, из-за разного положения точки *О* поворота поверхности; некоторые из этих вариантов показаны на рис. 1.3.34, в, г.

Если несколько таких деталей смонтированы в столбик (рис. 1.3.34, б), то при одних и тех же отклонениях от параллельности поверхностей каждой детали, положение верхней плоскости столбика относительно нижней плоскости при одном и том же допуске будет разным в зависимости от того, какое положение будут занимать детали.

На рис. 1.3.34 д, е показаны два варианта сборки трех деталей с одинаковыми угловыми погрешностями $\Delta\alpha$ плоскости *Б* относительно плоскости *А*. В первом случае (рис. 1.3.34, д) средняя деталь повернута при сборке на 180° таким образом, чтобы ее угловая погрешность была направлена в противоположную сторону угловым погрешностям двух других деталей. Тогда погрешность углового положения верхней плоскости столбика относительно основания равна $\Delta\alpha$.

Во втором случае (рис. 1.3.34, е) все угловые погрешности сложились и погрешность углового положения верхней плоскости столбика относительно основания равна $3\Delta\alpha$.

Чтобы компенсировать эти недостатки при расчетах, ужесточают допуски, что приводит к росту расходов, связанных с достижением такой точности. Непрерывный рост норм точности изделий требует совершенствования методов расчета размерных цепей.

Из-за указанных недостатков расчеты линейных и угловых цепей в случаях, когда требования к точности высоки, носят ориентировочный характер. Отставание методов расчета на точность, основанных на плоской модели размерных цепей, известны давно. Основная тематика работ

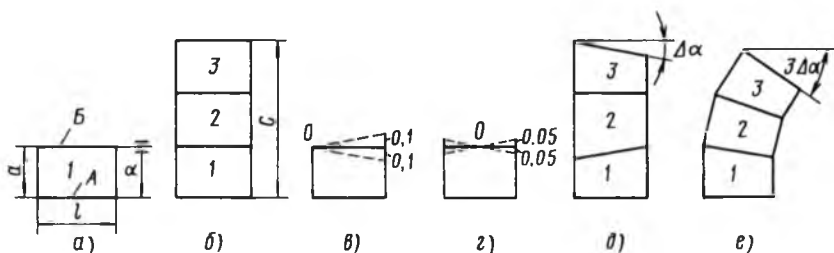


Рис. 1.3.34. Связи между размерами и поворотами поверхностей детали:

а – эскиз детали; *б* – сборочная единица из трех деталей; *в* – направление поворота поверхности *Б*; *г* – повороты поверхности *Б* при среднем положении точки *О*; *д* – сборочная единица из деталей с разным направлением поворота поверхности *Б*; *е* – сборочная единица из деталей с одинаковым направлением поворота поверхности *Б*

по совершенствованию методов расчетов была направлена на развитие методов суммирования так называемых векторных погрешностей. Однако недостатком таких решений являлось то, что и в этом случае за основу принималась плоская модель размерных цепей.

С целью повышения точности расчетов предлагается устанавливать и описывать размерные связи в машине с помощью пространственных размерных цепей. Наиболее полным решением задачи будет в том случае, если принять модель пространственной размерной цепи, базирующейся на известном положении теоретической механики, согласно которому положение твердого тела в пространстве описывается тремя линейными и тремя угловыми координатами. Такая модель отражает связи между линейными и угловыми размерами и их погрешностями.

Рассмотрим построение пространственной размерной цепи конструкции из двух столбиков, содержащих соответственно две и три детали (рис. 1.3.35), где замыкающим звеном является относительное положение поверхностей *А* и *Б*.

Упростим задачу, приняв в качестве замыкающего звена расстояние $\bar{r}_\Delta$

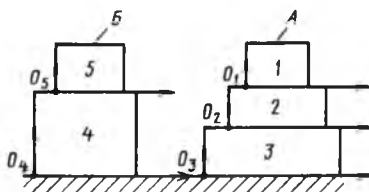


Рис. 1.3.35. Конструкция сборочной единицы из пяти деталей

между двумя точками поверхностей A и B деталей 1 и 5 и построим координатные системы на основных базах всех деталей (рис. 1.3.36).

Составляющими звеньями пространственной размерной цепи будут звенья, определяющие:

1 – положение поверхности A относительно комплекта основных баз детали 1 ;

2 – положение комплектов основных баз детали 1 относительно комплекта основных баз детали 2 ;

3 – положение комплекта основных баз детали 2 относительно комплекта основных баз детали 3 ;

4 – положение комплекта основных баз детали 5 относительно комплекта ее основных баз детали 4 ;

5 – положение поверхности B относительно комплекта основных баз детали 5 .

Как уже отмечалось, положение в пространстве одной детали относительно другой можно определить тремя расстояниями и тремя поворотами, построив для этого на основных базах деталей прямоугольные системы координат.

Основным понятием в теории размерных цепей является понятие звена, поэтому сформулируем понятие звена пространственной размерной цепи.

В постановке пространственной задачи звено пространственной размерной цепи должно отражать всю совокупность размерных связей, определяющих относительное положение двух геометрических элементов.

Таковыми геометрическими элементами могут быть сочетание поверхностей (например, комплект баз), поверхность, линия и точка.

Пользуясь изложенным, для описания звеньев пространственной цепи на комплектах основных и вспомогательных баз деталей должны быть построены прямоугольные системы координат, как это показано на рис. 1.3.35. Если теперь исключить из рисунка сами детали, то получим совокупность координатных систем и поверхностей A и B . Связав их радиус-векторами, получим пространственную размерную цепь (рис. 1.3.36). При рассмотрении относительного положения двух деталей звено пространственной размерной цепи должно отражать всю совокупность линейных и угловых размерных связей, определяющих относительное положение двух координатных систем. Тогда положение одной детали относительно другой можно определить с помощью радиус-вектора $\vec{r}$, соединяющего начала координатных систем и матрицы трех поворотов M .

Соединив координатные системы радиус-векторами при условии, что координатные системы деталей 3 и 4 совпадают, получим составляющие звенья пространственной размерной цепи (рис. 1.3.36):

$$\bar{r}_1 \bar{r}_2 \bar{r}_3 \bar{r}_4 \bar{r}_5.$$

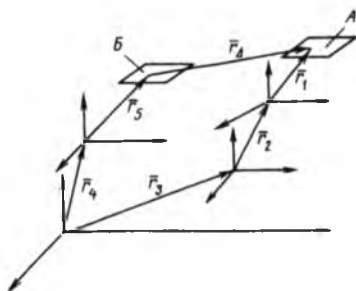


Рис. 1.3.36. Условное изображение пространственной размерной цепи

Итак, под *звеном пространственной размерной цепи* будем понимать радиус-вектор и матрицу поворотов, определяющих положение одного геометрического элемента относительно другого.

Графически звено пространственной размерной цепи изображается радиус-вектором, соединяющим два геометрических элемента. В аналитической форме звено пространственной размерной цепи в общем случае представляется как

$$\bar{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}; \quad M = M_x, M_y, M_z,$$

где x, y, z — координаты начала отсчета системы координат, положение которой определяется; M_x, M_y, M_z — матрицы поворотов координатной системы последовательно вокруг осей X, Y, Z .

Если в качестве геометрических элементов выступает плоскость, линия или точка, то количество переменных в функциях $r = f(x, y, z)$ и $M = f(M_x, M_y, M_z)$ соответственно будет меньше.

В зависимости от постановки задачи возможны разные варианты аналитического выражения звена пространственной цепи. Его разнообразие определяется разновидностями геометрических элементов и их сочетаний, относительно положение которых надо найти.

Варианты сочетаний геометрических элементов образуются такими геометрическими элементами, как сложная пространственная поверхность, пространственная кривая, плоскость, плоская кривая, прямая и точка. Аналитическое описание звена пространственной цепи будет зависеть от образующих его геометрических элементов. Например, если звено образуют две сложные пространственные поверхности, то оно будет

описываться шестью характеристиками, а если звено образовано двумя точками, то оно будет описываться одной характеристикой – расстоянием между ними.

Таким образом, для описания относительного положения двух геометрических элементов каждого сочетания, образующего звено пространственной размерной цепи, должно быть свое необходимое и достаточное число характеристик.

Для описания звеньев, образованных сочетанием "сложная пространственная поверхность – сложная пространственная поверхность", строятся координатные системы на обеих поверхностях и тогда их относительное положение описывается тремя линейными и тремя угловыми размерами.

Для всех других сочетаний геометрических элементов надо положение обоих элементов записать в системе координат, построенной на основных базах любой из двух деталей, которым принадлежат геометрические элементы, и записать их относительное положение в этой координатной системе.

Таким образом, в зависимости от решаемой задачи точность замыкающего звена может оцениваться по-разному.

В одном случае нужно учитывать отклонения всех параметров, характеризующих замыкающее звено, а в других случаях – только некоторые из них. Пользуясь понятием звена пространственной цепи, можно сформулировать ее определение.

Под *пространственной размерной цепью* понимается совокупность радиус-векторов, образующих замкнутый контур и соединяющих геометрические элементы, которые непосредственно участвуют своим положением в решении поставленной задачи.

Преимущество такого определения пространственной размерной цепи состоит в том, что в этом определении постулируется не только произвольный характер расположения звеньев в пространстве, но и пространственный характер погрешностей.

В графической интерпретации пространственная размерная цепь будет представлять собой замкнутый пространственный многоугольник, где его стороной является радиус-вектор, как это показана на рис. 1.3.36.

Определения замыкающего, составляющего, компенсирующего и общего звеньев сохраняют содержание, аналогичное звеньям плоских размерных цепей. Однако есть и отличия, вытекающие из определения звена пространственной размерной цепи.

Понятия *увеличивающего и уменьшающего звеньев*, используемые в теории плоских размерных цепей, теряют свой смысл, так как в случае пространственной размерной цепи одни характеристики составляющего звена при их изменении могут увеличивать характеристики замыкающего звена, а другие – уменьшать. Таким образом, можно лишь говорить о характере влияния изменения каждой из характеристик составляющего звена на значение той или иной характеристики замыкающего звена.

Понятия, приведенные в теории плоских размерных цепей, определяющие такие виды размерных цепей, как основная, производная, конструкторская, технологическая, измерительная, а также параллельно связанные, последовательно связанные, комбинированные размерные цепи, сохраняются и для пространственных размерных цепей.

Понятия линейной, угловой и плоской размерных цепей, как это сформулировано в теории плоских размерных цепей, теряют свой смысл в связи с пространственной постановкой задачи.

При расчете пространственных размерных цепей так же, как и линейных, решаются прямая и обратная задачи. При решении прямой задачи, исходя из установленных требований к точности замыкающего звена, определяют номинальные значения каждого из шести параметров, поля допусков, координаты середин полей допусков и предельные отклонения по каждому из параметров каждого составляющего звена.

При решении обратной задачи, исходя из установленных номинальных значений, полей допусков и координат середин полей допусков, по каждому параметру на каждое составляющее звено определяются номинальное значение, поле допуска, координаты середины поля допуска и предельные отклонения по каждому параметру замыкающего звена.

Принципиальное отличие расчета пространственной размерной цепи от линейной и угловой заключается в том, что номиналы и допуски на линейные параметры x , y , z и угловые φ , Ψ , θ рассматриваются как взаимосвязанные величины.

Если при решении прямой задачи линейной размерной цепи недостает нужного числа уравнений для определения числовых характеристик составляющих звеньев, то для пространственной размерной цепи этот недостаток усугубляется в еще большей степени из-за того, что увеличивается число переменных. Одной из важнейших задач в развитии теории пространственных размерных цепей и является разработка методов решения прямой задачи.

В решениях прямой и обратной задач сохраняются два принципиально отличных направления: расчет на максимум-минимум и вероятностный расчет. Первое направление применяется, когда требуется обеспечить 100 %-ю взаимозаменяемость изделий, второе направление

применяется, когда допускается определенная доля изделий, у которых возможно превышение отклонения замыкающего звена над его допуском.

Теорией и практикой применения плоских размерных цепей разработаны пять методов достижения точности замыкающего звена; все они по своему содержанию остаются справедливыми и для пространственных размерных цепей, однако расчетные формулы будут другими.

Основой методов расчета замыкающего звена является уравнение радиус-вектора как функции радиус-векторов и матриц поворотов составляющих звеньев. Оно содержит радиус-векторы $\bar{R}_i$, определяющие положение начал координатных систем и матрицы M'_i трех поворотов каждой координатной системы, последовательно вокруг каждой координатной оси, т.е.

$$\left. \begin{aligned} M_{\Delta} \bar{R}_{\Delta} &= f_1(M_1 \bar{R}_1; M_1 \bar{R}_1; \dots M_{m-1} \bar{R}_{m-1}; \bar{R}_m) \\ M_{\Delta} &= f_2(M'_2; M'_2; \dots M'_{m-1}) \end{aligned} \right\},$$

где $\bar{R}_{\Delta}$ – радиус-вектор замыкающего звена; M_{Δ} – матрица поворотов замыкающего звена; m – число звеньев в размерной цепи.

В обобщенном виде уравнение имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} M_{\Delta} \bar{R}_{\Delta} &= \sum_{i=1}^{m-1} M_i \bar{R}_i + \bar{R}_m \\ M_i &= \prod_{n=1}^i M'_{i-n+1}, \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\},$$

где n – порядковый номер составляющего звена; $\bar{R}_i$ – радиус-вектор i -го составляющего звена; M'_i – матрица поворотов или матрица направляющих конусов i -й координатной системы относительно базовой $(i-1)$ -й координатной системы.

Матрица M'_i вычисляется по следующей формуле:

$$M'_i = \begin{vmatrix} \cos \psi_i \cos \theta_i & \sin \varphi_i \sin \psi_i \cos \theta_i - & \sin \psi_i \cos \varphi_i \cos \theta_i + \\ & - \sin \theta_i \cos \varphi_i & + \sin \varphi_i \sin \theta_i \\ \sin \theta_i \cos \psi_i & \sin \varphi_i \sin \psi_i \sin \theta_i + & \sin \psi_i \sin \theta_i \cos \varphi_i - \\ & + \cos \varphi_i \cos \theta_i & - \sin \varphi_i \cos \theta_i \\ - \sin \psi_i & \sin \varphi_i \cos \psi_i & \cos \varphi_i \cos \psi_i \end{vmatrix}.$$

1.3.3. ВРЕМЕННЫЕ ЦЕПИ

Любой процесс, в том числе и технологический, протекает не только в пространстве, но и во времени. Качество технологического процесса, его производительность и себестоимость во многом связаны с затратами времени на осуществление каждого его этапа, поэтому представляет большой интерес установление связей между затратами времени на этапы процесса и определение законов их суммирования.

Анализ и синтез временных связей технологического процесса являются фундаментом для построения высокопроизводительных технологических процессов. Как правило, при проектировании технологических процессов затраты времени рассчитывают в номинальных величинах. Между тем многочисленные наблюдения свидетельствуют о существовании значительных отклонений фактических затрат времени от расчетных, причем эти отклонения носят как систематический, так и случайный характер. Это приводит к нарушению режимов функционирования механизмов, рассинхронизации этапов технологического процесса, возникновению явных и скрытых простоев исполнительных органов технологической системы и в итоге к нарушению ритмичности протекания процесса во времени.

Чтобы свести к минимуму эти негативные явления, следует рассчитывать затраты времени не только в номинальных величинах, но и в их отклонениях, а для этого следует воспользоваться временными цепями.

Объектом теории временных цепей применительно к машиностроению является разработка методов расчета затрат времени, методов управления технологическими процессами в реальном времени.

В основу формирования теоретических положений временных цепей должны быть положены основные свойства времени как одной из форм существования материи. События во времени характеризуются, с одной стороны, последовательностью, а с другой – длительностью. Последовательность (неодновременность) событий во времени отражает порядок смены состояний материи, в то время как смена состояний материи подразумевает некоторую продолжительность, длительность существования каждого сменяющегося состояния, ибо без наличия какой-либо длительности каждого состояния не может быть самого состояния.

Последовательность и длительность связаны с такими свойствами времени, как дискретность и непрерывность. Конечная длительность сменяющихся состояний материи определяет дискретность времени, а непрерывность времени выступает как свойство сохранения связей между сменяющимися друг друга явлениями. Кроме рассмотренных свойств,

время характеризуется такими свойствами как одномерность, односторонность, бесконечность и однородность.

Одномерность времени показывает, что следующие друг за другом последовательные состояния материи связаны непосредственно друг с другом, и эта связь полностью исчерпывается одним измерением. Непосредственным следствием этого свойства является возможность представления результата измерения времени одним числом.

Односторонность или необратимость времени означает, что последовательность состояний материи носит однозначный упорядоченный характер. Следствием односторонности времени является возможность рассмотрения времени как скалярной величины и представления результата измерения времени всегда положительным числом.

Бесконечность времени обусловлена вечностью мира, несотворимостью и неуничтожаемостью материи, формой движения которой является время.

Однородность времени состоит в том, что все его свойства остаются неизменными.

Следствием бесконечности и однородности времени является возможность произвольного выбора начала отсчета времени при любом его измерении. Бесконечность времени исключает существование естественного начального момента отсчета, а однородность времени позволяет выбрать за начало отсчета любой произвольный момент на оси времени.

Односторонность времени является проявлением необратимости развития мира. Но при этом необратимость не исключает повторяемости. Иными словами, чередование означает, что событие может повторяться. Итак, время непрерывно, необратимо, его нельзя остановить, изменить его направление или скорость.

На основе изложенного можно сформулировать следующие основные понятия и определения временных цепей по аналогии с размерными цепями. Однако, при этом свойства времени вносят существенные отличия в понятийный аппарат временных цепей и методов их расчета.

Звено временной цепи — отрезок прямой, условно отражающий промежуток времени. Принимая во внимание свойство необратимости времени, звено изображается в виде отрезка с одной стрелкой.

В отличие от звена размерной цепи, которая существует во времени целиком, представление звена временной цепи отрезком (от момента начала до момента окончания) в силу необратимости времени является условным, так как в момент окончания звена вся его предыдущая часть осталась в прошлом.

Временной цепью будем называть замкнутый контур отрезков прямой, отражающих продолжительности этапов процесса, следующих друг за другом.

Замыкающее звено временной цепи – это промежуток времени, который следует обеспечить (определить) в соответствии с поставленной задачей.

За замыкающее звено принимается продолжительность какого-либо процесса или промежуток времени, характеризующий несовпадение моментов начала или окончания каких-либо этапов процесса, например прихода в требуемое положение каких-либо органов машины.

Составляющее звено временной цепи – это промежуток времени, изменение которого вызывает изменение замыкающего звена.

Компенсирующее звено временной цепи – это промежуток времени, с изменением величины которого устраняется погрешность замыкающего звена.

Согласно приведенным определениям, временная цепь изображается графически в виде замкнутого контура расположенных один за другим отрезков прямой в строгом соответствии с последовательностью выполнения этапов процесса. Временные цепи могут быть двух типов: цепи с последовательно расположенными составляющими звеньями и цепи с параллельно расположенными составляющими звеньями (рис. 1.3.37).

Свойства необратимости и непрерывности времени находят свое отражение в том, что последовательность формирования временной цепи данного процесса из составляющих звеньев является единственной и не может быть изменена. В ней нельзя заменить или изменить какое-либо звено, как это делается в размерной цепи.

В связи с этим нумерацию составляющих звеньев следует осуществлять в одном направлении, например, слева направо в строгом соответствии с последовательностью выполнения этапов процесса. Если временная цепь содержит параллельные звенья, то нумерацию звеньев временной цепи в обеих ветвях проводят в одном направлении, а номер первого звена второй ветви является продолжением нумерации (см. рис. 1.3.37, б).

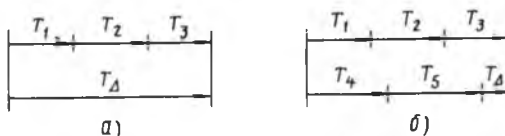


Рис. 1.3.37. Временные цепи:

а – с последовательными звеньями; б – с параллельными звеньями

В результате необратимости времени физическое существование звена временной цепи совпадает со временем осуществления данного этапа процесса, промежуток времени которого оно отображает. В силу этой же причины невозможно одновременное существование двух и более звеньев одной ветви временной цепи, как это имеет место в размерной цепи.

Итак, контур временной цепи является условным ее изображением, когда в рассматриваемый момент времени одни звенья могут быть в прошлом, а другие – в будущем.

Свойство непрерывности времени проявляется в том, что по окончании одного этапа процесса должен начинаться следующий этап, т.е. не может быть разрыва между смежными звеньями. Это обстоятельство имеет важное значение для построения временных цепей. При этом необходимо введение в цепь в качестве звеньев всех этапов процесса, включая и перемены, так как последние тоже изменяют значение замыкающего звена.

Под увеличивающим звеном временной цепи будем понимать звено, с увеличением которого увеличивается значение замыкающего звена; *под уменьшающим звеном* – звено, с увеличением которого уменьшается значение замыкающего звена.

Обозначим увеличивающее звено стрелкой, направленной вправо, со знаком плюс, а уменьшающее звено – стрелкой, направленной влево, со знаком минус, т.е

$$\vec{t}_i, -\vec{t}_i,$$

тогда значение замыкающего звена временной цепи

$$t_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} t_i \quad \text{или} \quad t_{\Delta} = \sum_{i=1}^k \vec{t}_i - \sum_{k+1}^{m-1} \vec{t}_i,$$

где i – номер составляющего звена; m – число звеньев временной цепи.

Для временной цепи с одной ветвью все составляющие звенья являются только увеличивающими.

В случае многократно повторяющегося процесса имеет место рассеяние значений составляющих звеньев, поэтому погрешность замыкающего звена может быть отображена кривой рассеяния и ее числовыми характеристиками, как и в размерных цепях:

$$T_{t_{\Delta}} = \sum_{i=1}^{m-1} |T_{t_i}|, \quad \omega_{t_{\Delta}} = \sum_{i=1}^{m-1} |\omega_{t_i}|,$$

где $T_{t_{\Delta}}$ и $\omega_{t_{\Delta}}$ – соответственный допуск и поле рассеяния замыкающего звена временной цепи.

В отличие от размерной цепи в формировании закона распределения значений замыкающего звена, вследствие необратимости времени, наблюдается определенная упорядоченность. Сущность этой упорядоченности заключается в том, что значение замыкающего звена i -го цикла всегда будет равно сумме составляющих звеньев временной цепи только i -го цикла.

Рассмотрим это явление в сопоставлении с размерной цепью. Пусть имеется трехзвенная размерная цепь зазора соединения «вал–втулка». При сборке i -го соединения в его состав может войти любой вал и любая втулка из множества изготовленных валов и втулок. Иными словами в размерных цепях, в отличие от временных цепей, при поступлении деталей на сборку деталь одного и того же номера может быть включена в размерную цепь любого соединения.

Введем некоторую упорядоченность в процесс соединения валов со втулками, задав правила выбора номеров вала и втулки, входящих в соединение. Сопоставим диаграммы изменения величины диаметров вала, втулки и зазора в соединении для двух случаев.

В первом случае в соединении участвуют вал и втулка одного номера, т.е. вал 1 и втулка 1, во втором соединении – вал 2 и втулка 2, и т.д. (рис. 1.3.38, б).

Во втором случае в первое соединение входит вал 1, а втулка берется с наибольшим номером n ; второе соединение собирается из вала 2 и втулки $n-1$, и т.д. (рис. 1.3.38, а).

На рис. 1.3.38, а и б приведены точечные диаграммы, сопоставление которых показывает существенную разницу в величине поля рассеяния зазора в зависимости от номеров вала и втулки в соединении.

В общем случае в соединении может участвовать любой номер вала и втулки, поэтому при расчете величина поля рассеяния замыкающего звена ω определяется как сумма величин полей рассеяния составляющих звеньев.

Во временной цепи этого не может быть, так как значение замыкающего звена i -го цикла всегда будет равно сумме составляющих звеньев временной цепи только i -го цикла. В этом и заключается упорядоченность, о которой говорилось выше. Например, пусть технологический процесс состоит из двух этапов продолжительностью t_1 и t_2 и пусть этот процесс повторяется n раз.

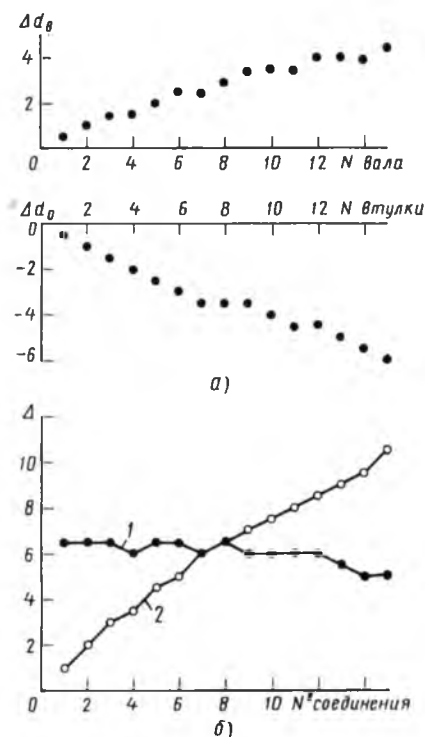


Рис. 1.3.38. Точечные диаграммы изменения величины зазора при сборке соединений:
а – отклонения диаметральных размеров валов d_d и отверстия d_o во втулках; *б* – величина зазора в первом случае (1) и во втором случае (2)

Согласно явлению упорядоченности, значение замыкающего звена t_{Δ} временной цепи t (рис. 1.3.39) j -го цикла будет равно сумме составляющих звеньев t_1, t_2 только j -го цикла, т.е.

$$t_{\Delta_1} = t_{1.1} + t_{2.1};$$

$$t_{\Delta_2} = t_{1.2} + t_{2.2};$$

⋮

⋮

⋮

$$t_{\Delta_n} = t_{1.j} + t_{2.j},$$

где t_1, t_2 – составляющие звенья временной цепи; j – номер цикла.

Таким образом, возможна только единственная точечная диаграмма изменения значения замыкающего звена и, следовательно, единственная кривая его рассеяния.

В условиях отмеченной упорядоченности временных цепей большое влияние на форму кривой рассеяния оказывают систематические факторы. Из рис. 1.3.40 видно, что величина поля рассеяния замыкающего звена в данном случае значительно меньше величины поля рассеяния любого из составляющих звеньев, так как систематические изменения последних имеют разное направление.

Рассмотренные выше свойства времени оказывают влияние и на методы достижения точности замыкающего звена временных цепей. Из пяти методов достижения точности замыкающего звена размерных цепей вследствие необратимости времени во временных цепях могут применяться только методы полной, неполной взаимозаменяемости и регулировки.

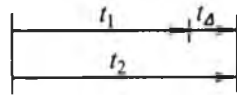


Рис. 1.3.39. Временная цепь

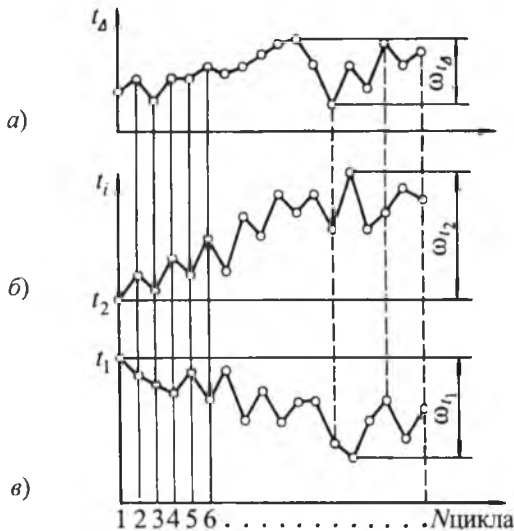


Рис. 1.3.40. Точечные диаграммы изменения значений звеньев временной цепи:

a — звена t_{Δ} ; *б* — звена t_2 ; *в* — звена t_1

Метод групповой взаимозаменяемости неприменим, так как во временной цепи нельзя в цепи j -го цикла какое-либо составляющее звено заменить на составляющее звено того же номера из другого цикла.

Метод пригонки неприменим физически. При применении метода регулировки имеется определенная специфика в выборе компенсирующего звена. В силу необратимости времени компенсирующее звено может уменьшать возникшие погрешности только предыдущих составляющих звеньев. Поэтому в качестве компенсирующего звена следует выбирать для цепи первого типа последнее составляющее звено во временной цепи. К моменту существования этого звена уже известны отклонения всех предыдущих звеньев и можно вычислить необходимую поправку, чтобы максимально уменьшить погрешность на замыкающем звене.

Для временной цепи с параллельными звеньями в качестве компенсатора целесообразно выбирать последнее составляющее звено в любой ветви.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое базирование, база, комплект баз?
2. Правило шести точек.
3. В чем разница между установочной, направляющей и опорной базами?
4. Назовите типовые комплекты баз.
5. В чем разница между двойной направляющей и двойной опорной базами?
6. Что такое явная и скрытая базы?
7. Что такое силовое замыкание?
8. Определенность и неопределенность базирования.
9. Раскрыть понятия конструкторской, технологической и измерительной базы.
10. Что такое основная и вспомогательная базы?
11. Что такое размерная цепь?
12. Перечислить все виды звеньев размерных цепей и раскрыть их понятия.
13. В чем различие между линейной и угловой размерной цепью?
14. В чем различие между параллельно и последовательно связанными размерными цепями?
15. Раскрыть методику построения конструкторской размерной цепи.

16. Перечислить методы достижения точности замыкающего звена.
17. В чем разница между методами полной и неполной взаимозаменяемости?
18. Сущность метода групповой взаимозаменяемости.
19. В чем разница между методами пригонки и регулировки?
20. Записать формулы расчета номинального размера замыкающего звена, поля допуска замыкающего звена, координаты середины поля допуска замыкающего звена, применяемые при расчете размерных цепей методами полной и неполной взаимозаменяемости.
21. Записать формулы расчета поля рассеяния и координаты поля рассеяния замыкающего звена.
22. Прямая и обратная задачи в расчетах размерной цепи.
23. Методика расчета размерных цепей методом полной взаимозаменяемости.
24. Методика расчета размерных цепей методом неполной взаимозаменяемости.
25. Методика расчета размерных цепей методом групповой взаимозаменяемости.
26. Методика расчета размерных цепей методом пригонки.
27. Методика расчета размерных цепей методом регулировки.
28. Перечислить основные свойства времени.
29. В чем отличие звена временной цепи от звена размерной цепи?
30. Каким из пяти методов достижения точности замыкающего звена размерной цепи нельзя пользоваться в расчетах временной цепи?
31. Какое звено временной цепи надо выбирать в качестве компенсирующего звена, чтобы компенсировать наибольшую погрешность на замыкающем звене?

Глава 1.4

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЕ ИЗДЕЛИЕ КАК ОБЪЕКТ ПРОИЗВОДСТВА

Как уже отмечалось, любое машиностроительное изделие является технической системой, описываемой совокупностью элементов, отношение к которым зависит от того, с каких позиций рассматривать изделие.

Конструктор представляет разработанное изделие в виде соответствующей документации согласно *техническому заданию* (ТЗ), согласованному с потребителем продукции (заказчиком). В качестве ТЗ допускается использование заменяющих документов (контракт, протокол, эскиз и др.), содержащих необходимые и достаточные требования для разработки, признанные заказчиком и разработчиком, а также образец продукции, предназначенной для воспроизведения. Конструкторская документация по оформлению должна соответствовать требованиям стандартов (ЕСКД), а также других государственных и отраслевых стандартов, действующих на момент разработки документации.

Рабочая конструкторская документация на изделие включает: сборочные чертежи изделия и его сборочных единиц, спецификацию, ведомость спецификаций, ведомость покупных изделий, чертежи деталей изделия, программу и методику испытаний, техническое описание и инструкцию по эксплуатации изделия.

Сборочный чертеж является графическим изображением изделия, соответствующего техническому заданию.

Спецификация – основной конструкторский документ на изделие, выполненный на отдельном бланке в соответствии со стандартом. Спецификация определяет состав сборочной единицы и необходима для изготовления и комплектования конструкторских документов, а также планирования запуска в производство указанных изделий. Спецификация состоит из отдельных разделов, располагаемых в следующем порядке: документация (сборочный чертеж, монтажный чертеж, габаритный чертеж, схемы, текстовые документы), комплексы, сборочные единицы, детали, стандартные изделия, прочие изделия, материалы, комплекты. Детали, на которые не разрабатывали чертежи, также включают в спецификацию.

Чертеж детали – основной конструкторский документ, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля (требования к точности размеров, формы относительного расположения поверхностей, требования к шероховатости поверхностей; сведения о материале детали, его физико-химические, механические и другие свойства; прочие технические требования).

После того как конструктор спроектировал изделие, его надо изготовить, и с этого момента его надо рассматривать как объект производства.

Если техническую систему рассматривать как объект производства, то она представляет собой совокупность сборочных единиц и деталей, обезличенных с точки зрения их функционального назначения.

Конструктор при составлении технической документации на изделие отражает информацию, главным образом, об изделии как объекте эксплуатации.

Что касается описания изделия как объекта производства, то эта сторона не находит достаточного отражения.

Технологу важно на этапе получения задания по выпуску нового изделия быстро и точно определить ожидаемую трудоемкость изготовления изделия, потребности в технологических средствах и возможность его изготовления в заданных производственных условиях. Однако необходимая для этого информация, приводимая в конструкторской документации, недостаточна для решения этой задачи. В значительной степени эта информация находится в неявном виде, и для ее получения требуется высокая квалификация технолога и достаточно большие затраты времени. Так, например, информация о структуре изделия, взаимосвязях между деталями, их подчиненности можно получить только на основе анализа сборочного чертежа изделия и спецификации.

Технологу в результате анализа указанной информации необходимо знать, какие детали выступают в качестве базовых, какие поверхности у деталей образуют комплекты основных и вспомогательных баз и др. Чтобы получить ответы на эти вопросы, надо затратить много времени на изучение указанных выше документов.

Задача была бы существенно упрощена, если бы эта информация была представлена в явном виде в виде таблиц посадок всех соединений, комплектов основных и вспомогательных баз с указанием уровней точности и шероховатости их поверхностей, уровней точности деталей – эта информация важна для определения трудоемкости изготовления изделия. Например, если одна деталь имеет одну поверхность с высокими требованиями к точности, а другая деталь имеет с десяток таких поверхностей, то трудоемкость их изготовления будет существенно различаться.

В документации должны быть даны результаты размерного анализа конструкции изделия в виде перечня размерных цепей с указанием деталей и их размеров, участвующих в размерных цепях, с указанием вида связей размерных цепей (параллельные, последовательные), деталей, чьи размеры являются общими, и с указанием этих размеров, величинами допусков на звенья размерных цепей, методов достижения точности замыкающих звеньев, заложенных в конструкции и др.

Технологу важно знать для построения технологического процесса детали не столько марку ее материала, сколько характеристики обрабатываемости этого материала, а в ряде случаев и рекомендуемые методы обработки.

Наличие указанной информации в явном виде не только упростит задачу технолога, но и послужит конструктору критерием оценки качества проекта в сопоставлении с другими вариантами.

В связи с этим назрела необходимость в разработке метода описания изделия как объекта производства, что в условиях быстрой смены выпускаемых изделий приобретает особую актуальность.

Чтобы технологу на этапе изучения изделия оценить возможность его изготовления, ожидаемую трудоемкость и потребности в средствах технологического оснащения (технологического оборудования, сборочных и станочных приспособлений, контрольно-измерительных средств, инструмента и др.), нужно разработать технологические процессы. Однако разработка технологических процессов характеризуется высокой трудоемкостью и длительностью, что входит в противоречие со сроками оценки изделия на этапе его изучения. Поэтому нужен иной метод оценки возможностей изготовления изделия, не предполагающий подробной разработки технологических процессов.

Известно, что технологический процесс – это совокупность технологических вспомогательных переходов, объединенных в операции, которые осуществляются в определенной последовательности. При изготовлении детали технологическими переходами являются переходы по обработке поверхностей, а при сборке изделия – переходы по соединению деталей. Поэтому если изделие рассматривать как совокупность поверхностей входящих в него деталей, то оценить изготовление изделия, не разрабатывая технологических процессов, можно с помощью трудоемкости технологических переходов по изготовлению поверхностей деталей и соединению деталей.

В связи с этим конструкцию изделия следует представлять как совокупность соединений и поверхностей деталей. Для этого надо выйти на другой уровень абстракции в представлении изделия и его деталей: представлять не сборочный чертеж изделия и чертежи деталей, а структурированное множество соединений и поверхностей деталей.

Для этого сначала следует представить изделие как совокупность поверхностей деталей и оценивать его изготовление с помощью технологических переходов по обработке поверхностей и их соединений. При этом необходимо ответить на вопрос, что понимать под поверхностью детали – для однозначного представления детали совокупностью поверх-

ностей. Часто в качестве поверхностей принимают элементарные геометрические поверхности типа плоскости, цилиндра, конуса и т.п.

Однако деталь выполняет свои служебные функции, как правило, с помощью сочетания поверхностей. Поэтому представление изделия совокупностью геометрически элементарных поверхностей не учитывает их служебного назначения и разработанные технологические переходы под их изготовление могут претерпевать существенные изменения при разработке технологических процессов. В итоге оценка изготовления изделий таким методом будет существенно отличаться от фактической.

В связи с этим надо в конструкции изделия найти такой элемент, технология изготовления которого составляла бы элемент технологического процесса, включаемый в его состав без существенных изменений. Такими элементами являются сочетания поверхностей деталей, с помощью которых деталь выполняет служебные функции, получившие название *модулей поверхностей* [3].

Ранее уже отмечалось, что деталь участвует в выполнении своего служебного назначения посредством двух видов поверхностей: базисующих и рабочих, в качестве которых выступают, как правило, не отдельные поверхности, а сочетания поверхностей.

Если воспользоваться понятием *модуль поверхностей* (МП), то любую деталь можно представить как совокупность не отдельных элементарных поверхностей, а модулей поверхностей.

Если под модули поверхностей создать банк технологических переходов их изготовления и средств технологического оснащения, то оценить изготовление деталей изделия можно будет быстро и с высокой точностью.

Для аналогичной оценки конструкции изделия с точки зрения его сборки надо знать не столько состав сборочных единиц, сколько все соединения деталей, заложенные в конструкции изделия, и технологические переходы их осуществления, которые составляют сущность сборочного технологического процесса.

Традиционно конструкцию изделия как объекта производства рассматривают в виде совокупности сборочных единиц и деталей. Однако состав сборочных единиц неоднозначен и зависит от целого ряда факторов: габаритов изделия и деталей, их массы, вида посадки, количества выпускаемых изделий, удобства сборки, влияющих на характер сборочного технологического процесса. В связи с этим формирование сборочных единиц следует рассматривать как этап разработки сборочного технологического процесса.

Соединение деталей представляет собой совмещение комплекта вспомогательных баз базовой детали с комплектом основных баз присое-

диняемой детали. Условимся такое соединение называть *модулем соединения (МС)*.

Если известны все соединения деталей, которые надо осуществить при сборке конструкции изделия, то, зная технологию осуществления каждого соединения, можно быстро и с высокой точностью оценить возможность, трудоемкость и средства технологического оснащения, необходимые для сборки изделия.

При рассмотрении изделия как объекта производства, представленного совокупностью МП и МС, для оценки его изготовления требуется информация о конструкциях МП, МС, их характеристиках (размеры, требования к точности и шероховатости, виды соединений, типы посадок и т.п.).

Эту информацию можно найти в конструкторской документации на изделие, но в неявном виде. Поэтому задача заключается в том, чтобы найти эту информацию и преобразовать ее в форму, удобную для оценки изделия как совокупности МП и МС.

Наличие такой информации позволит технологу на этапе ознакомления с изделием, не разрабатывая технологические процессы, определять возможности и потребности производства для изготовления изделия.

Разработка метода описания изделия как объекта производства приобретает особую актуальность в современных условиях, когда наблюдается частая смена выпускаемых изделий и надо быстро оценить возможности изготовления изделий, потребности в технологических средствах, ожидаемую трудоемкость и себестоимость.

Для этого нужен метод замещения изделия структурированным множеством МП и МС; при этом МП и МС должны представлять собой объективно существующие элементы изделия; только в этом случае они приобретают общий характер для всего машиностроения и могут применяться для описания любого изделия.

1.4.1. МОДУЛЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ (МП) ДЕТАЛИ

Любая деталь, создаваемая конструктором, предназначена выполнять соответствующее служебное назначение посредством ее поверхностей. Следовательно, каждая ее поверхность предназначена выполнять определенную служебную функцию.

Анализ деталей различных изделий показывает, что независимо от того, в какие изделия входит деталь, она предназначена или непосредственно участвовать в рабочем процессе, осуществляемом изделием, и (или) выполнять роль базовой детали для монтажа на ней других деталей. Таким образом, признак служебного назначения позволяет классифици-

ровать все детали (независимо от их конструктивного и геометрического оформления, материала, массы) на детали: базовые; участвующие в рабочем процессе; выполняющие роль базовых и одновременно участвующих в рабочем процессе.

Между этими характеристиками детали и ее служебным назначением существуют связи. Именно служебное назначение детали предопределяет ее конструктивные формы, размеры, материал, требования к точности и т.д. Например, если деталь предназначена передавать крутящий момент, то она должна вращаться, следовательно, конструктивно она будет выполнена в виде тела вращения. В зависимости от передаваемого крутящего момента будет выбран соответствующий материал детали и т.д.

В соответствии с приведенной на рис. 1.2.1 (с. 28) классификацией поверхности детали в итоге подразделяются на базирующие, рабочие и связующие.

С помощью рабочих поверхностей деталь осуществляет рабочий процесс. Например, если деталь является инструментом, то в зависимости от его типа у нее должны быть поверхности для резания материала или выдавливания и т.д. Если деталь, например, зубчатое колесо, предназначена передавать крутящий момент, то у нее будет набор боковых поверхностей зубьев, которые являются рабочими поверхностями.

Для того чтобы деталь могла выполнять функции базовой детали для других деталей, она должна содержать базирующие поверхности, по которым они монтируются на ней. Например, чтобы на вал смонтировать зубчатое колесо, вал должен иметь комплект вспомогательных баз в виде торца, наружной цилиндрической поверхности и плоскости, образуемой боковой поверхностью шпонки. Для этого у зубчатого колеса должен быть набор базирующих поверхностей, образующих ответный комплект баз в виде торца, внутренней цилиндрической поверхности и шпоночного паза.

Итак, чтобы деталь могла выполнять свое служебное назначение, она должна иметь соответствующий набор рабочих и базирующих поверхностей. При этом необходимо, чтобы все поверхности сохраняли заданное относительное положение в процессе работы детали. Таким образом, зубчатое колесо для выполнения служебного назначения можно представить (см. рис. 1.2.2) набором боковых поверхностей зубьев, например, эвольвентной формы и комплектом баз (торец, отверстие, шпоночный паз). И никакие другие поверхности зубчатому колесу с точки зрения служебного назначения не нужны. Но при этом необходимо обеспечить точное и постоянное относительное положение указанных поверхностей. Стоит только нарушить их относительное положение, как

сразу снизится качество работы передачи, может произойти заклинивание, появится неравномерность вращения и т.п. Поэтому требуется связать эти два вида поверхностей с помощью связующих поверхностей в одну систему.

Связующие поверхности, как правило, сами непосредственно не участвуют в выполнении детали ее служебного назначения; их задача заключается в объединении всех исполнительных поверхностей в единое пространственное тело – деталь, и придание ей требуемых форм и размеров.

В настоящее время связи между поверхностями осуществляются с помощью материала, когда деталь создается из одного куска материала.

В перспективе, возможно, появятся и другие виды связей исполнительных поверхностей, и тогда надобность в связующих поверхностях может отпасть. Например, если использовать магнитные силы для обеспечения относительного положения исполнительных поверхностей детали, то деталь не будет представлять собой монолит и у нее могут отсутствовать связующие поверхности.

Рассмотрим конструктивное оформление исполнительных и связующих поверхностей.

Базирующие поверхности. Как следует из теории базирования, для того чтобы установить деталь в заданное положение, ее надо лишить всех шести степеней свободы. Для этого она должна иметь комплект баз, на котором будут располагаться шесть опорных точек.

Функции базирующих поверхностей накладывают определенные ограничения на разнообразие их конструктивного оформления. Например, в качестве установочной и направляющей баз, как правило, используется плоская поверхность; в качестве двойной направляющей базы и двойной опорной базы чаще всего выступает поверхность вращения, например, цилиндрическая поверхность; в качестве опорной базы может выступать небольшой участок поверхности любой формы.

Рассматривая рабочие поверхности деталей, следует прежде всего установить рабочие функции, которые выполняют детали. Рабочие функции можно разделить по роду *рабочих процессов*, в которых участвуют детали:

- процесс обработки;
- передача движения (вращательного, поступательного);
- герметизация;
- хранение сыпучих и жидких материалов;
- передача рабочей среды и др.

Для осуществления каждого из перечисленных рабочих процессов детали имеют соответствующие рабочие поверхности. Если, к примеру, деталь участвует в процессе обработки заготовки резанием, то у детали, именуемой в данном случае инструментом, будет набор поверхностей, образующих режущую часть.

У штампа рабочая поверхность чаще всего представлена сложной по форме поверхностью; колесо центробежного насоса имеет рабочие поверхности для передачи рабочей среды; у турбинной лопатки рабочей поверхностью служит поверхность сложной формы.

Если деталь предназначена передавать движение, то она выступает в роли звена кинематической цепи и имеет соответствующие рабочие поверхности. Например, для поступательного движения деталь имеет комплект направляющих поверхностей.

Из приведенных примеров видно, что рабочие поверхности зависят от характера рабочего процесса, в котором участвует деталь, и могут представлять собой как совокупность поверхностей, так и отдельные поверхности, среди которых встречаются поверхности сложной геометрической формы. Условимся под поверхностями простой геометрической формы понимать плоские поверхности и поверхности вращения.

Как уже отмечалось, связующие поверхности необходимы прежде всего для достижения и сохранения требуемого относительного положения исполнительных поверхностей. Выполняя эту главную задачу, связующие поверхности попутно выполняют и ряд других вспомогательных функций, в ряде случаев оказывающих существенное влияние на геометрическую форму как самих связующих поверхностей, так и детали в целом. К таким функциям относятся:

- придание детали соответствующих конструктивных форм, обусловленных требованиями прочности, экономии материала, эстетики;
- ограничение габаритных размеров исполнительных поверхностей;
- обеспечение технологичности детали и др.

Например, если деталь представляет собой тело вращения и крепится консольно, то с позиции равной прочности деталь будет иметь поверхность вращения сложной формы. Чтобы избежать концентраторов напряжений, необходимо обеспечить связь между торцем и поверхностью вращения через поверхность, обеспечивающую плавный переход, и т.д. Большое влияние связующие поверхности оказывают на технологичность детали как для получения заготовки, так и для ее обработки и сборки изделия. В связи с этим связующие поверхности выполняются в виде различного рода канавок, скосов, фасок и т.п.

В то же время, несмотря на то, что связующие поверхности не участвуют в выполнении деталью ее служебных функций, они могут оказы-

вать существенное влияние на качество работы детали. Например, для детали типа тела вращения погрешности формы и расположения связующих поверхностей могут вызвать дисбаланс. В связи с этим в ряде случаев к качеству связующих поверхностей могут предъявляться достаточно высокие требования.

Анализ выполнения деталями их служебных функций позволяет сделать важный вывод о том, что деталь выполняет свое служебное назначение, в основном, сочетаниями поверхностей и только в ряде случаев отдельными поверхностями. Поэтому деталь можно представить как совокупность сочетаний поверхностей (реже отдельных поверхностей) соответствующего служебного назначения. Они и являются теми элементами, из которых можно создать любую деталь независимо от того, к какому изделию она принадлежит. В связи с этим было введено понятие **модуля поверхностей (МП)**, под которым понимается сочетание поверхностей (или отдельная поверхность), предназначенных выполнять соответствующую служебную функцию детали и придавать детали конструктивную форму, обусловленную требованиями эксплуатации и изготовления.

Положив в основу классификации модулей поверхностей их служебный признак, можно все модули поверхностей разделить на три класса МП: базисуищие (МПБ), рабочие (МПР), связующие (МПС) (рис. 1.4.1).

Деление всех модулей поверхностей по служебному признаку на три класса придает им однозначность в определении и является главным отличием и преимуществом данной классификации. На предприятии грамотный конструктор или технолог сможет однозначно сгруппировать все поверхности любой детали на модули трех классов.

Следующим шагом в разработке классификации модулей поверхностей является деление каждого класса на подклассы, группы, подгруппы. При этом следует помнить, что любая классификация характеризуется объектом классификации, перечнем отличительных признаков и их последовательностью, согласно которой производится группирование объектов.

В существующих классификациях поверхностей деталей в качестве первого признака принимают геометрический, в соответствии с которым деталь представляется в виде совокупности элементарных поверхностей. Например, при кодировании деталь рассматривают как структуру, состоящую из множества элементов. Различают элементы основной формы детали и элементы, находящиеся в отношении наложения к элементам основной формы. Элементы основной формы детали – это поверхности, образующие главный контур детали: наружные и внутренние, цилиндрические, конические, криволинейные, поверхности вращения, плоские торцы, поверхности движения. Элементы, находящиеся в отношении наложения, расположены на элементах основной формы – это фаски, лыски, резьбы, дополнительные отверстия, шлицы, зубья и т.п.

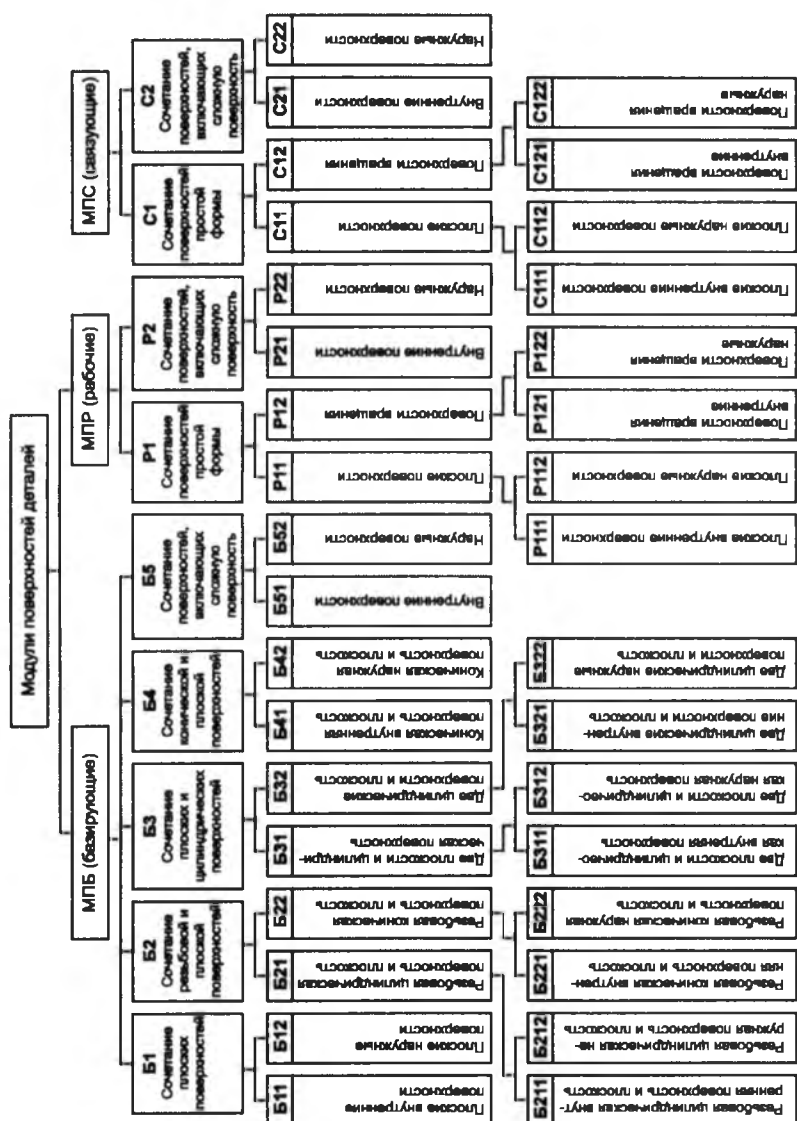


Рис. 1.4.1. Классификация модулей поверхностей

Такое деление детали на отдельные поверхности искусственно разделяет поверхности, предназначенные совместно выполнять ту или иную функцию детали. С другой стороны, одну и ту же деталь можно представить разными наборами поверхностей, в зависимости от того, что понимать под "элементарной" поверхностью. В рассматриваемом случае при построении классификации МП группирование МП производится не по геометрическому, а по служебному признаку.

В конечном итоге задача классификации заключается в том, чтобы получить номенклатуру МП в виде их конструктивно-геометрического оформления, которые в дальнейшем служат проектными модулями. Далее каждый класс МП должен подразделяться по признакам, характеризующим конструктивно-геометрическое оформление МП.

Рассмотрим деление класса базирующих модулей. Задача любого МПБ – лишить объект всех степеней свободы. В зависимости от схемы базирования и типа базирующих поверхностей, входящих в состав МПБ, последние имеют соответствующее конструктивно-геометрическое оформление.

Класс МПБ характеризуется наличием у модуля трех базирующих поверхностей, на которых может быть построена прямоугольная система координат с расположением шести опорных точек по схеме $3 - 2 - 1$. Принимая во внимание возможный набор поверхностей, где поверхность лишает деталь от одной до четырех степеней свободы, можно по конструктивно-геометрическому признаку разделить класс МПБ на пять подклассов.

Первый, четвертый и пятый подклассы (Б1, Б4, Б5) делятся на две группы по характеру поверхностей, образующих модуль. Комплекты баз, содержащие внутренние (охватывающие) поверхности, вошли в первую группу (Б11, Б41, Б51), а комплекты баз, образованные наружными (охватываемыми) поверхностями, вошли во вторую группу (Б12, Б42, Б52).

Подклассы Б2 и Б3 делятся на две группы по геометрическим разновидностям поверхностей, входящих в подклассы. В группу Б21 входят базирующие модули поверхностей, содержащие цилиндрическую резьбовую поверхность, а в группу Б22 – базирующие модули, содержащие коническую резьбовую поверхность. В свою очередь каждая из групп Б21 и Б22 делится на две подгруппы: Б21 делится на Б211 и Б212 в зависимости от того, охватывающей или охватываемой является резьбовая цилиндрическая поверхность; аналогично и Б22 делится на Б221 и Б222 в зависимости от того, охватывающей или охватываемой является резьбовая коническая поверхность.

Также подкласс БЗ делится на две группы БЗ1 и БЗ2. В БЗ1 входят базирующие модули, содержащие две плоскости и цилиндрическую поверхность, а в группу БЗ2 – базирующие модули, содержащие две цилиндрические поверхности и одну плоскую. Далее каждая из групп базирующих модулей поверхностей БЗ1, БЗ2 подразделяются на две группы БЗ11, БЗ12 и БЗ21, БЗ22 по признаку охватываемой или охватывающей цилиндрической поверхности.

Классификация рабочих модулей (МПР) сложнее, поскольку в отличие от базирующих модулей у МПР служебные функции разнообразнее. Конструктивно-геометрическое оформление МПР зависит от характера рабочего процесса, в осуществлении которого он участвует.

Если для деления МПР на подклассы в качестве отличительного признака принять тип рабочего процесса, то может оказаться, что в разных подклассах окажутся МПР одинакового конструктивно-геометрического оформления. Чтобы этого не произошло, деление МПР на подклассы и группы следует производить по признакам, отражающим конструкторско-геометрические характеристики. В дальнейшем, по мере накопления данных о встречающихся МПР и их анализа появится возможность внести уточнения в их классификацию.

В связи с изложенным предлагается класс МПР разделить на подклассы Р1 и Р2, в которые входят соответственно модули с совокупностями поверхностей простой и сложной формы. В свою очередь каждый подкласс делится на две группы по виду поверхности (охватываемая или охватывающая). Группы Р11 и Р12 делятся на подгруппы Р111, Р112 и Р121, Р122 также по виду поверхностей (охватываемая, охватывающая).

Аналогично, на тех же основаниях и по тем же признакам, была проведена классификация связующих модулей (МПС). Класс МПС был разделен на подклассы С1 и С2, а они в свою очередь на группы С11, С12 и С21, С22; группы С11 и С12 разделены на подгруппы С111, С112 и С121, С122.

На рис. 1.4.2 приведены примеры конструктивного оформления каждого из 26 видов МП. Как следует из рис. 1.4.2, модули поверхностей в силу простоты конструктивного оформления описываются небольшим набором характеристик.

Из изложенного следует, что МП отличается однозначностью в определении, которое ему придает его служебное назначение, простотой конструкции и высокой устойчивостью. Например, как показывает практика, конструктивное оформление МП за последние полвека не претерпело принципиальных изменений и нет признаков их существенного изменения в обозримом будущем.

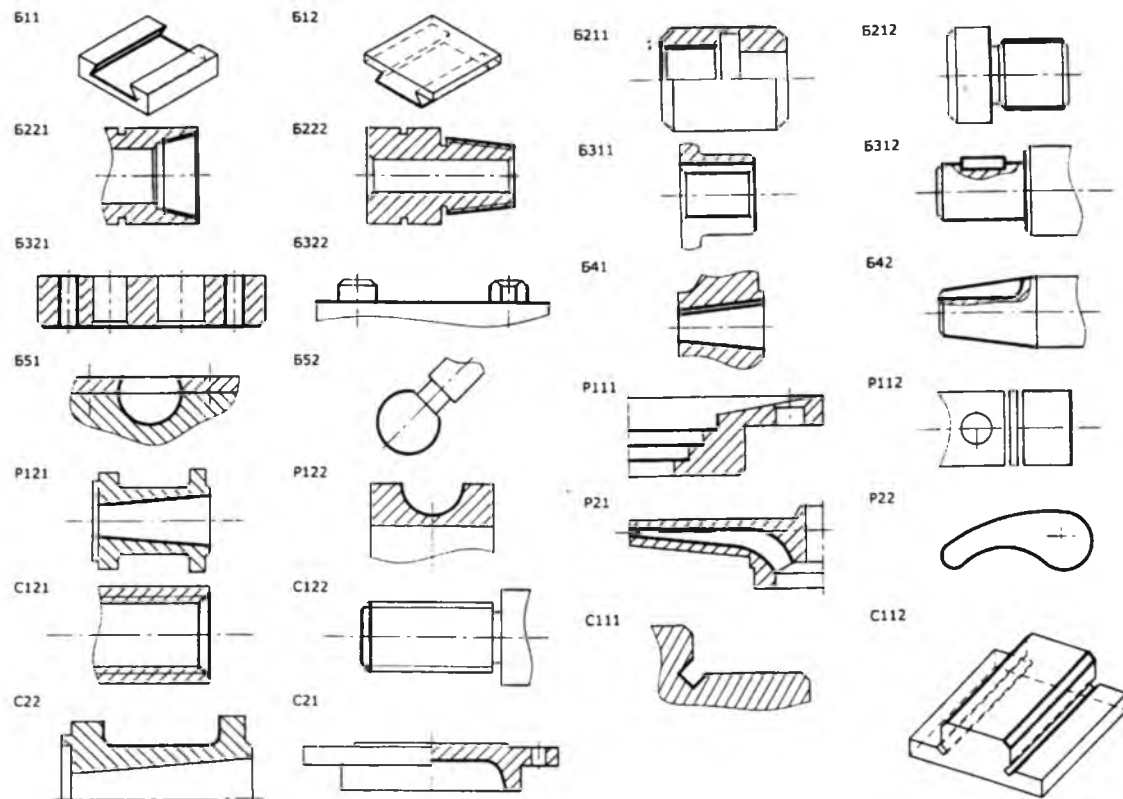


Рис. 1.4.2. Примеры конструктивного оформления модулей поверхностей

В качестве примера представления детали совокупностью МП на рис. 1.4.3, *а* и *б* представлены редуктор конической передачи и его корпус. Редуктор устанавливается плоскостью основания и двумя отверстиями корпуса, выполняющих роль комплекта основных баз и образующих базировочный модуль 1Б321. Как следует из рис. 1.4.3, *б*, корпус имеет только один рабочий модуль поверхностей – Р21, выполняющий роль емкости под масло. Корпус редуктора содержит еще целый ряд базировочных модулей, выполняющих роль комплектов вспомогательных баз. В частности, поверхности 1 и 2 образуют базировочный модуль 6Б311, по которым базируется левый стакан подшипника. Аналогично поверхности 3 и 4 образуют базировочный модуль 18Б311 под правый стакан, в который установлены два подшипника. Для крепления обоих стаканов в корпусе предусмотрены базировочные модули Б211 по четыре штуки под крепление каждого стакана (на чертеже видны только 5Б211, 8Б211 и 17Б211, 20Б211). Эти базировочные модули содержат только одну базировочную поверхность в виде внутренней резьбовой поверхности, другая поверхность этих модулей – торец – принадлежит стакану.

Для слива масла в редукторе предусмотрена заглушка, под которую в корпусе редуктора имеется базировочный модуль 26Б221, выполненный в виде внутренней конической резьбовой поверхности. Под крышку, закрывающую корпус редуктора, предусмотрен базировочный модуль 12Б321, являющийся неполным комплектом баз и содержащий одну плоскую поверхность.

Для крепления крышки к корпусу редуктора в корпусе имеется двенадцать базировочных модулей Б211 (из которых на чертеже видны только два – № 10 и № 14) под установку винтов, каждый из которых содержит лишь одну базировочную поверхность в виде внутренней цилиндрической резьбы, а вторая поверхность – торец, принадлежит крышке. Остальные поверхности корпуса редуктора относятся к связующим поверхностям, образующим соответствующие МПС.

В итоге корпус редуктора представляется совокупностью соответствующих МП, которые указываются выносными линиями, подобно выносным линиям на сборочном чертеже, указывающим детали, входящие в состав изделия.

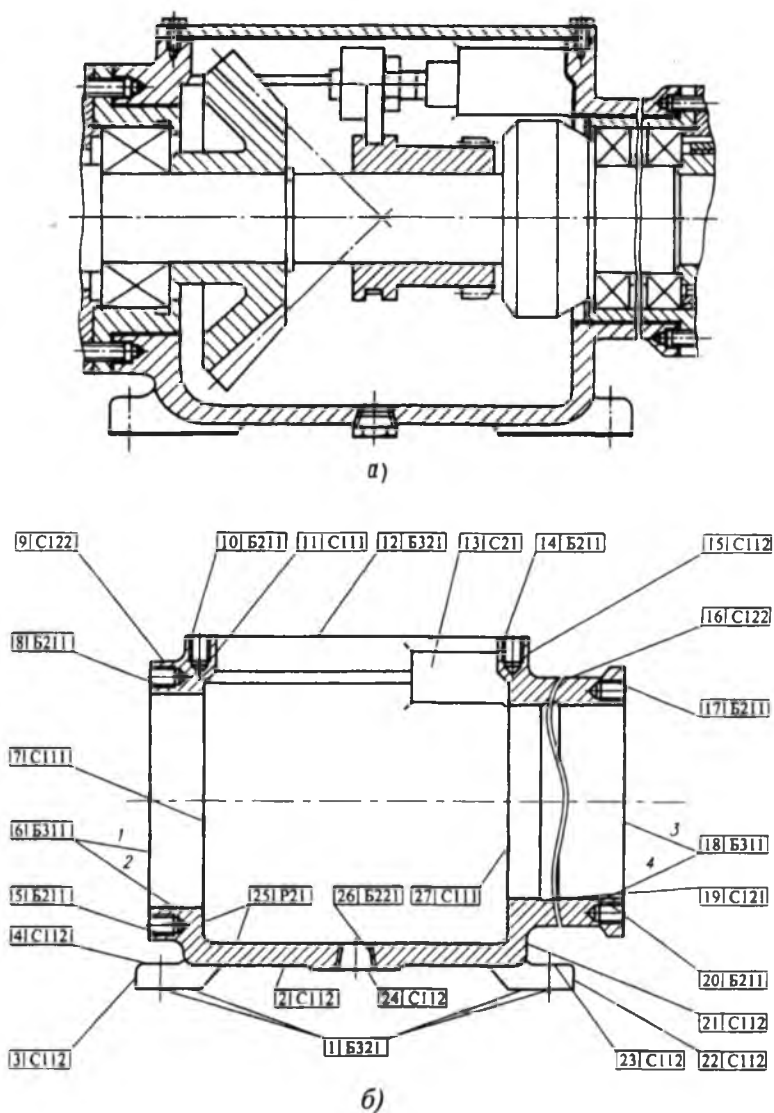


Рис. 1.4.3. Представление детали совокупностью МП:
а – конический редуктор; б – корпус редуктора

1.4.2. ЧЕРТЕЖ ДЕТАЛИ В МОДУЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Применение МП в качестве конечного элемента детали позволяет по-новому подойти к ее проектированию. Пользуясь представлением детали как совокупности МП, конструктор для выполнения ею служебного назначения закладывает в детали соответствующие МП. К примеру, разрабатывая редуктор, конструктор, задавшись кинематической схемой, выполняет эскиз корпуса редуктора, вписывает в него основные детали – звенья кинематической цепи. Под эти детали он предусматривает комплекты баз в корпусе и далее, с помощью связующих поверхностей, формирует контур корпуса, придавая ему нужную форму, стремясь при этом свести к минимуму затраты материала, обеспечивая требуемую прочность и т.д.

Иными словами, опытный конструктор, по существу, мыслит "не отдельными поверхностями, а сочетаниями поверхностей", и в этом случае формализация этих представлений в виде модулей поверхностей помогает ему в проектировании деталей.

Проектирование деталей методом компоновки из МП предполагает и иное оформление чертежа, по сути чертеж детали становится сборочной единицей. На чертеже детали должны быть указаны МП, из которых она состоит, шифр каждого МП в соответствии с классификацией, порядковые номера МП, как это показано на рис. 1.4.3.

Иначе должны проставляться и размеры на чертеже детали, тем более, что существующие методы простановки размеров имеют серьезные недостатки.

Анализ литературы по простановке размеров показал, что нет единого общепринятого метода простановки размерных связей. Среди многочисленных разработок в этой области можно выделить общие моменты, на которые авторы в той или иной степени рекомендуют опираться при простановке размеров на чертежах деталей.

Например, имеются попытки классифицировать размеры, предлагая различать основные размеры и сопряженные, размеры, входящие в размерные цепи изделия, и свободные размеры. Под основными понимаются размеры, которые связывают основные поверхности детали, непосредственно участвующие в рабочем процессе машины. Различают размеры, являющиеся звеньями сборочных размерных цепей, а также размеры, входящие в системы размеров, координирующие размеры и т.п.

При простановке размеров в ряде работ различают простановку в зависимости от типа поверхности детали, например, размеры: для кривых поверхностей деталей, для деталей, изготовленных гибкой, и т.п.

Отсутствие единого метода приводит к тому, что разные конструкторы неоднозначно решают задачу простановки размеров на чертежах детали. Как правило, при простановке размеров на чертеже детали последняя рассматривается как совокупность элементарных геометрических поверхностей без учета их служебного назначения. Например, все размеры указываются на чертежах отрезками со стрелками по концам, и тем самым не показываются конструкторские базы, которые надо знать технологам при выборе технологических баз.

В связи с изложенным разработка единого метода простановки размеров приобретает особую актуальность, особенно если учесть бурное развитие работ по автоматизированному проектированию чертежей деталей.

В основу метода простановки размеров на чертежах деталей должно быть положено служебное назначение поверхностей. Предлагаемое модульное представление детали как нельзя лучше позволяет решать эту задачу. В этом случае все размерные связи детали должны, с одной стороны, определять относительное положение модулей поверхностей, а с другой стороны, – описывать поверхности, составляющие модуль и их положение внутри модуля поверхностей.

Назовем размерные связи, определяющие относительное положение модуля поверхностей на детали, внешними связями, а определяющие положение поверхностей внутри модуля – внутренними размерными связями.

Внешние размерные связи. Для установления внешних размерных связей модуля поверхностей необходимо на его поверхностях построить прямоугольную координатную систему. МП представляет собой пространственную фигуру, поэтому его положение однозначно определяется шестью координатами: тремя линейными и тремя угловыми. Назовем эти шесть координат координирующими размерами МП.

База, относительно которой задается положение МП, определяется его служебным назначением и деталью, которой он принадлежит, и должна рассматриваться как прямоугольная координатная система.

Задача простановки координирующих размеров для большинства базизирующих модулей решается сравнительно просто. Любой базизирующий модуль предназначен для реализации соответствующей схемы базирования, поэтому на его поверхностях сравнительно просто строить координатную систему. В тех случаях, когда детали оставляется одна или несколько степеней свободы, базизирующий МП является неполным комплектом баз, и координатные плоскости строятся на имеющихся поверх-

ностях модуля, а к ним достраиваются недостающие координатные плоскости так, чтобы получилась полная координатная система.

Сложнее строить координатную систему на МПР и МПС, так как рабочие и связующие МП могут представлять собой как отдельные поверхности, так и совокупности поверхностей, расположенных друг относительно друга под произвольными углами, и, кроме того, часто их поверхности бывают сложной пространственной формы. В таких случаях конструктору предоставляется право привязки координатной системы к МП по своему усмотрению, но желательно разработать единую методику построения координатной системы. К внешним размерным связям относятся также размеры, описывающие габариты детали.

Внутренние размерные связи. К внутренним размерным связям относятся размеры, определяющие относительное положение поверхностей МП. Поскольку базирующие, рабочие и связующие МП выполняют разные служебные функции, то и простановка размерных связей внутри этих модулей должна производиться по-разному.

Рассмотрим простановку внутренних размерных связей поверхностей базирующего МП. Каждая поверхность модуля выполняет роль базы, с помощью которой деталь лишается соответствующего числа степеней свободы. Согласно числу лишаемых степеней свободы на базирующей поверхности должно располагаться такое же количество опорных точек.

Для установления размерных связей между поверхностями, составляющими базирующий МП, следует построить прямоугольную систему координат. Построение координатной системы должно начинаться с построения координатной плоскости на поверхности, лишаящей деталь трех степеней свободы, т.е. на установочной базе. Далее достраиваются остальные две координатные плоскости: сначала на направляющей базе, а потом на опорной базе.

Тогда внутренними размерными связями будут размеры, связывающие направляющую базу с установочной базой и опорную базу с установочной и направляющей базами.

Если базируемой детали оставляется одна или несколько степеней свободы, то это означает, что число опорных точек в ее схеме базирования будет меньше шести, и базирующий МП будет содержать одну или две поверхности. В этом случае для определения внутренних размерных связей не требуется построения полной координатной системы.

В качестве примера построим координатную систему на поверхностях модуля Б12. С помощью трех опорных точек полностью определя-

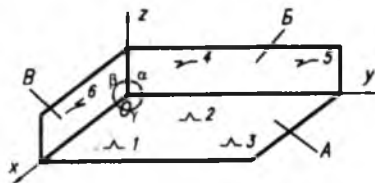


Рис. 1.4.4. Различные связи относительного положения поверхностей МПБ12

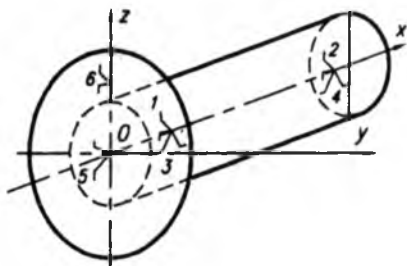


Рис. 1.4.5. Построение координатной системы МПБ312

ется положение установочной базы в пространстве, поэтому в качестве базы для простановки размерных связей внутри модуля Б12 примем установочную базу А (рис. 1.4.4).

Для определения положения направляющей базы Б относительно установочной, зная положение начала системы координат, достаточно задать угол α . Для определения положения опорной базы В надо задать два угла: угол γ определяет положение опорной базы относительно установочной базы; угол β определяет положение относительно направляющей базы. Углы α , β , γ должны быть равны 90° .

Как видно, размерными параметрами, определяющими относительное положение поверхностей внутри модуля Б12, являются только угловые величины. В зависимости от конструкции МПБ относительное положение его поверхностей может описываться другими параметрами.

Другой пример, когда в комплект поверхностей базирующего МП, например МПБ311, входит двойная направляющая база, то построение координатной системы (рис. 1.4.5) надо начинать с построения координатной плоскости (в рассматриваемом примере ZOX), проходящей через ось поверхности двойной направляющей базы и одной опорной базы и лишающей деталь с помощью трех опорных точек 1, 2, 6 трех степеней свободы. Далее строится вторая координатная плоскость ZOY , тоже проходящая через ось поверхности двойной направляющей базы, и, затем, достраивается третья координатная плоскость YOX .

Поскольку опорная база (точка 6) является скрытой базой, то МПБ311 содержит только торец и цилиндрическую поверхность. В этом случае внутренними размерными связями будут только два угла между торцом и осью.

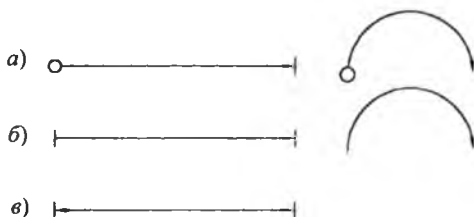


Рис. 1.4.6. Условные обозначения размеров

Для рабочих и связующих МП определение внутренних размерных связей осуществляется по такой же методике: сначала строится прямоугольная координатная система, а затем в ней относительно одной из поверхностей МП, выбранной в качестве базы, определяются размерные характеристики, устанавливающие положение других поверхностей МП. При этом надо четко представлять служебное назначение каждой поверхности МП.

К внутренним размерным связям относятся и размеры, описывающие геометрию поверхностей, входящих в состав МП. Например, для модулей Б12, Б311 такими размерами будут длина, ширина, высота, диаметр цилиндрической поверхности. Для сложных поверхностей добавятся радиусы и др.

Таким образом, все размеры, которые описывают деталь, можно разделить на четыре типа:

- координирующие размеры, определяющие относительное положение МП;
- координирующие размеры, определяющие относительное положение поверхностей, составляющих МП;
- размеры, описывающие геометрическую форму поверхностей МП;
- размеры, описывающие габариты детали.

Координирующие размеры МП – это размеры, определяющие относительное положение двух модулей поверхностей, один из которых выступает в роли конструкторской базы. Условимся координирующие размеры МП обозначать отрезком (линейный размер) и дугой (угловой размер), ограниченными с одной стороны точкой, а с другой стороны – стрелкой, направленной на базу (рис. 1.4.6, а).

В общем случае для определения положения МП относительно базы (МПб) с построенными на них координатными системами, на чертеже детали необходимо нанести три линейных и три угловых координирующих размера, как это показано на рис. 1.4.7. Три проекции $\bar{R}$ по трем координатным осям будут линейными размерами на осях X , Y , Z , а три угла φ , ψ , θ – угловыми размерами, где угол φ – поворот координатной системы МП вокруг оси OX , угол ψ – вокруг оси OY и угол θ – вокруг оси OZ .

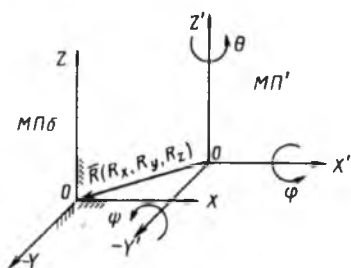


Рис. 1.4.7. Размерные связи, определяющие положение МП

При простановке координирующих размеров МП возникает задача согласования координатных систем МП с проекциями чертежа, так как в банке МП каждый модуль поверхностей должен иметь свою координатную систему, ориентированную определенным образом относительно его поверхностей. В зависимости от положения МП на детали проекции осей его координатной системы относительно проекций чертежа детали могут занимать различное положение. В связи с этим возникает необходимость в определении проекций координатной системы МП на каждом виде чертежа. Для этого сначала надо каждому виду чертежа (в плане, фронтальном, сбоку) присвоить соответствующую плоскость прямоугольной системы координат, а затем сформулировать правила определения проекции координатной системы МП на каждом виде чертежа.

При такой простановке размеров отпадает надобность в таких геометрических характеристиках, представляемых на чертежах деталей, как параллельность и перпендикулярность, которые заменены теперь соответствующими угловыми размерами.

Координирующие размеры поверхностей определяют относительное положение поверхностей внутри МП.

Число координирующих размеров, определяющих положение поверхности внутри МП, зависит от вида поверхности. Например, для определения положения плоской поверхности достаточно задать один линейный и два угловых координирующих размера. Для определения положения цилиндрической поверхности достаточно задать четыре координирующих размера – два линейных и два угловых.

Предлагается обозначить линейный размер отрезком с одной стрелкой, направленной на базу и угловой размер – дугой с одной стрелкой, направленной на базу (см. рис. 1.4.6, б).

Размеры, описывающие геометрию поверхностей, габариты детали обозначаются традиционно (см. рис. 1.4.6, в).

Предложенный метод простановки размеров отличается тем преимуществом, что обеспечивает единый подход к простановке размеров независимо от вида поверхности и конструкции детали.

На чертежах сложных деталей плохо просматриваются размерные связи МП, поэтому целесообразно в дополнение к чертежу давать граф размерных связей МП.

Для технолога важно знать, какие модули поверхностей выступают в роли конструкторских баз. Поэтому построение графа размерных связей МП детали поможет технологу сразу видеть все конструкторские базы и МП, заданные относительно них.

Рассмотрим построение графа МП на примере корпуса редуктора конической передачи, эскиз которого см. на рис. 1.4.3, б.

Построение графа МП (рис. 1.4.8) начинается с базирующего МП, выступающего в роли комплекта основных баз детали, которым является 1Б321, образованный плоскостью основания корпуса и двумя цилиндрическими отверстиями. Размерные связи между МП устанавливаются конструктором на основе анализа служебного назначения каждого МП.

Пусть вал редуктора (см. рис. 1.4.3, а) является выходным, передающим вращение какому-либо устройству, установленному на том же основании, что и конический редуктор. Тогда ось выходного вала должна быть параллельна основанию. Отсюда оси отверстий под стаканы должны быть параллельны основанию.

Следовательно, 6Б311 и 18Б311 (см. рис. 1.4.3, б) должны быть заданы относительно 1Б321. Но в этом случае погрешность относительного положения модулей 6Б311 и 18Б311 равна сумме погрешностей их положения относительно 1Б321, поэтому правильнее задать положение одного из них относительно 1Б321, а второго — относительно первого. Например, пусть 18Б311 будет задан относительно 1Б321, тогда 6Б311 должен быть задан относительно 18Б311.

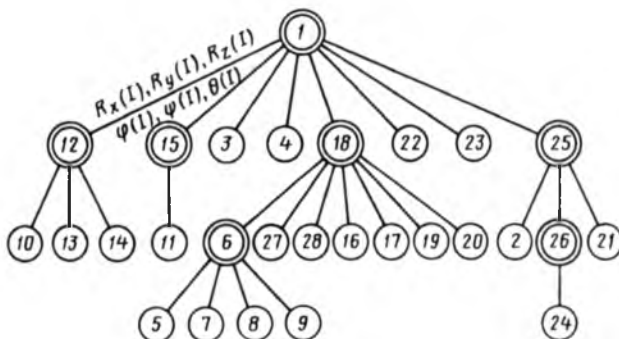


Рис. 1.4.8. Граф МП корпуса редуктора

Рабочий модуль 25P21 должен быть задан относительно 1Б321, чтобы уровень масла располагался горизонтально.

Стаканы в корпусе крепятся посредством ввинчивания винтов в корпус, поэтому модули 5Б211 и 8Б211 должны быть заданы относительно 6Б311, а модули 17Б211 и 20Б211 – относительно 18Б311.

Модуль 26Б221 предназначен для ввинчивания конической пробки, поэтому он должен быть связан с 25P21.

Верхняя плоскость корпуса предназначена для установки крышки. Крышка базируется по плоскости и двум штифтам (один из которых срезаемый). Штифты в корпусе отсутствуют, под них имеются два отверстия, которые вместе с верхней плоскостью образуют модуль 12Б321, задаваемый относительно 1Б321.

Модули 10Б211 и 14Б211 предназначены для крепления крышки, устанавливаемой по поверхностям модуля 12Б321, поэтому они должны быть заданы относительно него.

Теперь остается определить положения связующих модулей; с их помощью формируются главным образом стенки корпуса, поэтому они связаны с соответствующими вышеприведенными модулями, например:

модули 2С112, 4С112, 23С112, 22С112 связаны с 1Б321;

модули 2С112, 21С112 связаны с 25P21;

модули 7С11 и 9С122 связаны с 6Б311;

модули 16С122, 28С121 и 27С111 связаны с 18Б311;

модули 11С111, 13С21, 15С112 связаны с 12Б321.

В итоге получаем граф размерных связей МП (см. рис. 1.4.8), который несет следующую информацию: конструкторские базы, обведенные для наглядности двумя кругами, и конструкторские размерные связи МП. На лучах графа (как это показано на рис. 1.4.8) указываются величины допусков всех линейных и угловых координирующих размеров МП.

Граф имеет четыре уровня и содержит семь конструкторских баз: 1Б321, 12Б321, 18Б311, 25P21, 26Б221 и 6Б311.

Итак, чертеж детали представляется "сборочной единицей", состоящей из МП. На рис. 1.4.9, а в качестве примера приведен чертеж детали в модульном представлении, на котором выносными линиями указаны все МП, входящие в состав детали – с указанием номера МП и его шифра. Нумерация МП должна начинаться с МП, выполняющего роль комплекта основных баз, и продолжается по часовой стрелке. На рис. 1.4.9, б показан граф МП этой детали.

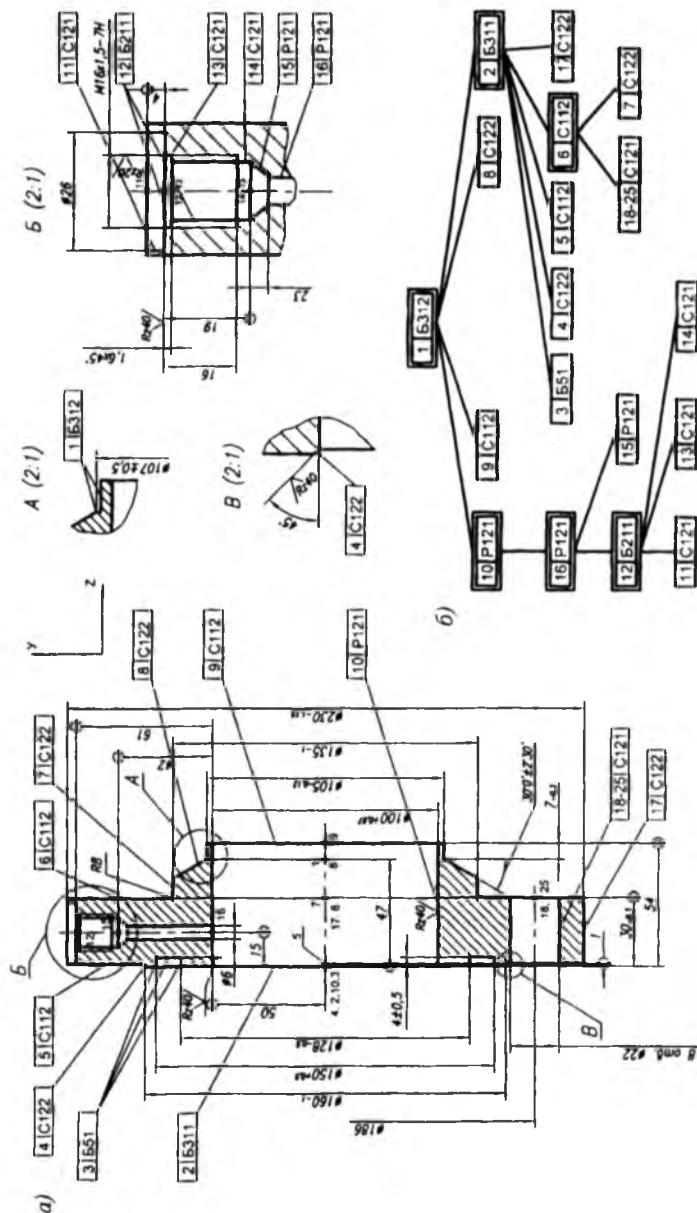


Рис. 1.4.9. Чертеж крышки в модульном исполнении:

a – чертеж крышки; *б* – граф МП

Таблица 1.4.1

№ (см. рис. 1.4.9)	МП	Базовые МП	Параметры относительного положения МП					
			X, мм	Y, мм	Z, мм	φ°	ψ°	θ°
1	МПБ 312	—	0	0	0	0	0	0
2	МПБ 311	1 МПБ 312	0	0	-47	0	0	0
3	МПБ 51	2 МПБ 311	0	0	0	0	0	0
4	МПС 122	2 МПБ 311	0	0	0	0	0	0
5	МПС 112	2 МПБ 311	0	0	1	0	0	0
6	МПС 112	2 МПБ 311	0	0	30 _{-0,3}	0	0	0
7	МПС 122	1 МПБ 312	0	0	-8,7	0	0	0
8	МПС 122	1 МПБ 312	0	0	0	0	0	0
9	МПС 112	2 МПБ 311	0	0	54	0	0	0
10	МПР 121	1 МПБ 312	0	0	-47	0	0	0
11	МПС 121	12 МПБ 211	0	4	0	0	0	0
12	МПБ 211	12 МПР 121	0	61	0	0	0	0
13	МПС 121	12 МПБ 211	0	0	0	0	0	0
14	МПС 121	12 МПБ 211	0	-19	0	0	0	0
15	МПР 121	16 МПР 121	0	42	0	0	0	0
16	МПР 121	10 МПР 121	90	50	15	0	0	0
17	МПС 122	1 МПБ 312	0	0	-17	0	0	0
18	МПБ 311	1 МПБ 312	-46,5	80,4	-17	0	0	0
19	МПБ 311	1 МПБ 312	-80,4	46,5	-17	0	0	0
20	МПБ 311	1 МПБ 312	-80,4	-46,5	-17	0	0	0
21	МПБ 311	1 МПБ 312	-46,5	-80,4	-17	0	0	0
22	МПБ 311	1 МПБ 312	46,5	-80,4	-17	0	0	0
23	МПБ 311	1 МПБ 312	80,4	-46,5	-17	0	0	0
24	МПБ 311	1 МПБ 312	80,4	46,5	-17	0	0	0
25	МПБ 311	1 МПБ 312	46,5	80,4	-17	0	0	0

Для построения чертежа в модульном представлении необходимо иметь банк МП в виде чертежей с нанесенной прямоугольной координатной системой (координатная система необходима для простановки на чертеже детали координирующих размеров, определяющих положение МП). В связи с этим на чертеже должны быть нанесены координатные системы каждого МП, т.е. определены положения начал отсчета и направления координатных осей.

Если на чертеже детали нанести оси координатных систем всех составляющих ее МП с указанием начал координатных систем, то при наличии большого числа МП чертеж окажется перегруженным условными обозначениями, что затруднит его чтение. Поэтому в таких случаях с целью разгрузки чертежа от условных обозначений можно предложить все координирующие размеры МП отражать в спецификации, прилагаемой к чертежу (табл. 1.4.1), в которой должны быть указаны МП, конструкторские базы, шесть координирующих размеров X , Y , Z , φ , ψ , θ , направления осей координатных систем МП и допуски на координирующие размеры, а также положение координатной системы МП относительно координатной системы чертежа. В тех случаях, когда деталь содержит небольшое число МП, можно системы координат и координирующие размеры нанести на самом чертеже.

При "бесбумажном" производстве, когда чертеж детали отсутствует и на станки с ЧПУ поступают соответствующие управляющие программы, проблема перенасыщения чертежа условными обозначениями отсутствует и реализация предложенной системы простановки размеров решается значительно проще.

При оформлении чертежа детали желательно на нем или отдельно к нему построить граф МП, который наглядно показывает конструкторские размерные связи между МП, конструкторские базы, уровень точности относительного положения МП и др.

1.4.3. МОДУЛЬ СОЕДИНЕНИЯ (МС) ДЕТАЛЕЙ

Машиностроительное изделие – это структурированное множество сборочных единиц и деталей, монтаж которых в изделии осуществляется посредством соединения деталей с помощью базирующих модулей поверхностей.

Соединение деталей осуществляется посредством совмещения двух базирующих модулей поверхностей (МПБ), один из которых является комплектом основных баз и принадлежит присоединяемой детали, а второй является комплектом вспомогательных баз и принадлежит базовой детали.

Совмещая комплекты основных и вспомогательных баз, получаем **модуль соединения** (МС).

Представляет большой практический интерес установление встречающегося разнообразия МС и создание банка конструкторских решений МС с их характеристиками.

Наличие такого банка позволит разработать типовую технологию и технологические средства их осуществления, быстро оценивать (с достаточно высокой степенью точности) трудоемкость сборки изделия, потребности в технологических средствах оснащения.

Чтобы установить возможное разнообразие МС, встречающихся в различных конструкциях изделий, воспользуемся классификацией МП и основными положениями базирования.

Приведенный в Единой системе допусков и посадок (ЕСДП) перечень типовых соединений является далеко не полным, охватывая лишь часть встречающихся на практике соединений [4].

Кроме того, в некоторых случаях типовые соединения входят в противоречие с основными положениями базирования.

В соответствии с классификацией МП (см. рис. 1.4.1) номенклатура МПБ ограничена 14 наименованиями. При этом базирующим модулям Б11, Б211, Б221, Б311, Б321, Б41, Б51 соответствуют ответные им по конструктивному оформлению и характеристикам базирующие модули Б12, Б212, Б222, Б312, Б322, Б42, Б52.

Как следует из парности базирующих модулей поверхностей, номенклатура МС ограничена семью наименованиями:

Б11 } Б12 }	МС1	Б211 } Б212 }	МС2	Б221 } Б222 }	МС3	
Б311 } Б312 }	МС4	Б321 } Б322 }	МС5	Б41 } Б42 }	МС6	Б51 } Б52 } МС7

Таким образом, под **модулем соединения (МС)** понимается пара совмещенных МПБ одной классификационной группы, принадлежащих соединяемым деталям, один из которых выступает в качестве комплекта вспомогательных баз, а другой МПБ – комплекта основных баз.

Деление МПБ в условиях сборки на основные и вспомогательные комплекты баз условно и зависит от технологического процесса сборки. На рис. 1.4.10 приведены примеры всех семи наименований МС и образующих их МПБ.

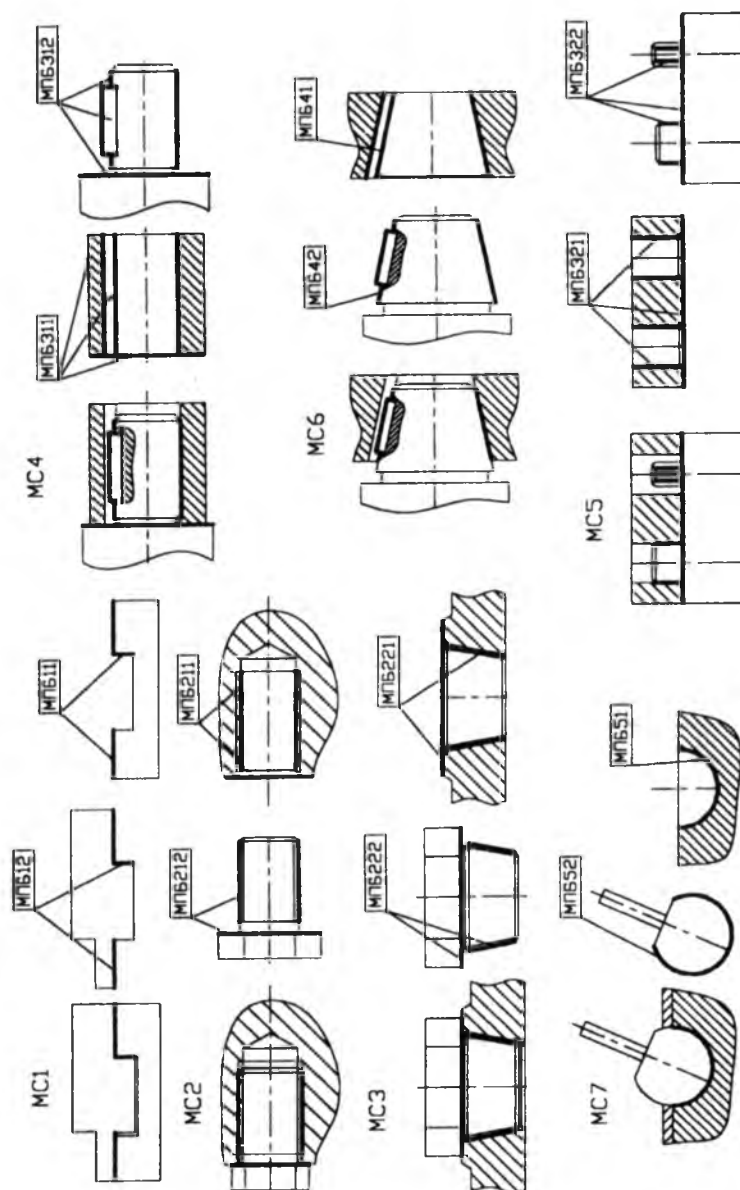


Рис. 1.4.10. Примеры конструктивного оформления МС

Таким образом, совмещение прямого и ответного МПБ образует модуль соединения (МС). Например, если зубчатое колесо базируется на валу МПБ образованным торцем, отверстием и боковой поверхности шпоночного паза, то вал должен иметь МПБ, образованный торцем, наружной цилиндрической поверхностью и боковой поверхностью шпонки.

Соединения бывают неподвижными и подвижными; в свою очередь неподвижные соединения бывают неразъемными и разъемными. Однако в процессе сборки после осуществления соединения присоединяемая деталь должна занять определенное положение относительно базовой детали. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только неподвижные соединения.

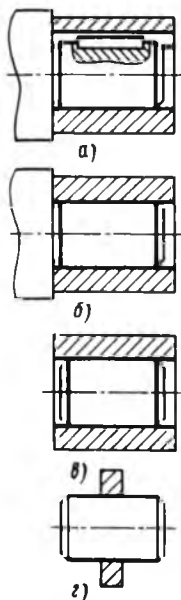


Рис. 1.4.11. Примеры модуля соединения МС4 при лишении присоединяемой детали степеней свободы:
 а – шести; б – пяти;
 в – четырех; г – двух

При сборке соединения присоединяемая деталь лишается шести степеней свободы и поэтому прямой и ответный МПБ являются полными комплектами баз; при этом базы могут быть как явными, так и скрытыми.

Каждый вид МС может выступать в роли неподвижного и подвижного соединения. В последнем случае присоединяемой детали оставляется одна или несколько степеней свободы. На рис. 1.4.11 в качестве примера приведены варианты МС4, где присоединяемая деталь лишена 6, 5, 4 и 2 степеней свободы.

С учетом изложенного, возможное разнообразие модулей соединения можно представить в виде классификации на рис. 1.4.12.

В соответствии с изложенным, типовые соединения, приведенные в ЕСДП, лишь частично охватывают рассмотренные выше модули соединения, как это видно из последующего анализа.

К типовым соединениям, приведенным в ЕСДП, относятся гладкие цилиндрические, конические, резьбовые (включая винтовые), плоские (включая шпоночные), шлицевые и сферические соединения.

Рис. 1.4.12. Классификация МС
с учетом числа лишаемых
степеней свободы



Гладкое цилиндрическое соединение ("вал–втулка") относится к модулю МС4, получаемому совмещением МПБ311 с МПБ312, где:

МПБ311 – модуль поверхностей, являющийся комплектом баз, образованным двумя плоскостями и цилиндрической внутренней поверхностью;

МПБ312 – модуль поверхностей, являющийся комплектом баз, образованным двумя плоскостями и цилиндрической наружной поверхностью.

В качестве двух плоскостей, как правило, рассматривают торец и боковую поверхность шпонки или шпоночного паза.

Если у модулей МПБ311 и МПБ312 убрать торец и боковые поверхности шпоночного паза и шпонки, то получим соединение "вал–втулка", где втулка имеет две степени свободы: возможность поступательного перемещения вдоль оси вала и вращательного движения на валу. Таким образом, соединение "вал–втулка" образуется неполными комплектами баз МПБ311 и МПБ312 и является частным случаем МС4.

В случае посадки с натягом соединение становится неподвижным. Тогда можно говорить о появлении двух скрытых баз, лишающих присоединяемую деталь возможности перемещаться вдоль оси и вращаться вокруг нее; однако точность положения по этим направлениям не задается.

На практике чаще встречаются соединения типа МС4, лишающие присоединяемую деталь всех или пяти степеней свободы.

Гладкое коническое соединение является соединением МС6 и представляет собой совмещение МПБ41 с МПБ42, где:

МПБ41 – модуль поверхностей, являющийся комплектом баз, образованным конической *внутренней* поверхностью и плоскостью;

МПБ42 – модуль поверхностей, являющийся комплектом баз, образованным конической *наружной* поверхностью и плоскостью.

При этом в качестве плоскости у модуля Б41 выступает боковая поверхность шпоночного паза, а у модуля Б42 – боковая поверхность шпонки. Отсутствие боковых поверхностей приводит соединению, рассматриваемое в системе допусков и посадок, к частному случаю МС6.

Плоское соединение является соединением МС1 и представляет собой совмещение МПБ11 с МПБ12, где:

МПБ11 – модуль поверхностей, являющийся комплектом баз, образованным тремя плоскими *внутренними* поверхностями;

МПБ12 – модуль поверхностей, являющийся комплектом баз, образованным тремя плоскими *наружными* поверхностями.

К этому типу соединения относятся шпоночные соединения, а также соединения, представляющие собой частный случай МС1, например, соединение "ласточкин хвост", где присоединяемой детали оставляется одна степень свободы – поступательное движение.

Шлицевое соединение. Рассмотрим шлицевое соединение с прямобоковыми шлицами. В этом соединении возможны три способа центрирования: по наименьшему диаметру d , по наибольшему диаметру D и по боковым поверхностям шлицев (рис. 1.4.13).

При центрировании по d или D это соединение можно отнести к модулю МС4, если рассматривать соединяемые детали абсолютно твердыми телами. В этом случае контакт шлицев со стенками впадин будет происходить по одному из них. Это объясняется наличием погрешностей расположения шлицев в угловом направлении, однако какой из шлицев войдет в контакт, неизвестно и носит случайный характер.

Таким образом, имеем частный случай соединения МС4, где у присоединяемой детали оставляется одна степень свободы – поступательное перемещение вдоль оси.

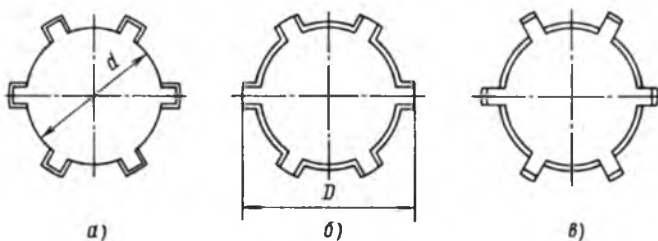


Рис. 1.4.13. Шлицевое соединение:

а – центрирование по d ; б – центрирование по D ;
в – центрирование по боковым поверхностям шлицев

В действительности, поскольку детали обладают упругостью, за счет упругих деформаций контакт будет осуществляться по нескольким шлицам.

В случае центрирования по боковым поверхностям прямобоковых шлицев такое соединение нельзя отнести ни к одному из модулей соединения. Здесь можно говорить о взаимосвязанной системе нескольких МС1, где каждая пара "шлиц-впадина" представляет собой отдельный МС1 и они взаимосвязаны друг с другом.

Такая система МС1 охвачена дополнительными связями, что затрудняет достижение высокой точности базирования деталей при их соединении. Аналогичные системы возникают в шлицевых соединениях с другими формами шлица.

Резьбовые и винтовые цилиндрические соединения являются соединением МС2 и различаются формой профиля. Соединение представляет собой совмещение МПБ211 с МПБ212, где:

МПБ211 – модуль поверхностей, являющийся комплектом баз, образованным резьбовой цилиндрической внутренней поверхностью и плоскостью;

МПБ212 – модуль поверхностей, являющийся комплектом баз, образованным резьбовой цилиндрической наружной поверхностью и плоскостью.

Резьбовое коническое соединение представляет собой модуль соединения МС3, образованного совмещением МПБ221 с МПБ222, где:

МПБ221 – модуль поверхностей, являющийся комплектом баз, образованным резьбовой конической внутренней поверхностью;

МПБ222 – модуль поверхностей, являющийся комплектом баз, образованным резьбовой конической наружной поверхностью.

В некоторых случаях можно встретить резьбовое коническое соединение, когда имеет место еще контакт по торцам для обеспечения герметичности и повышенной прочности соединения.

Строго говоря, если принимать соединяемые детали абсолютно твердыми телами, контакта по торцам не должно быть. В реальных условиях он обеспечивается за счет высокой точности изготовления, наличия зазора в соединении резьбовых поверхностей и упругих деформаций соединяемых деталей. В этих случаях условно можно включить торец в состав комплектов баз.

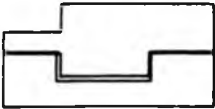
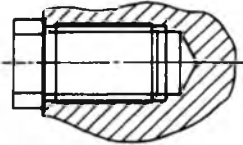
Сферическое соединение, примером которого является шарнирное соединение, является частным случаем модуля соединения МС7, образованного совмещением МПБ51 и МПБ52, где:

МПБ51 – представляет собой комплект баз, образованный сочетанием внутренних поверхностей, включающих сложную поверхность или представляющий собой только сложную внутреннюю поверхность;

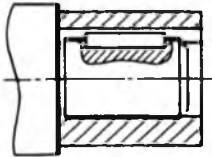
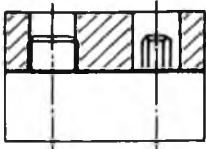
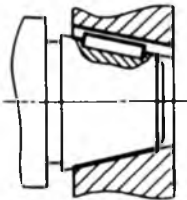
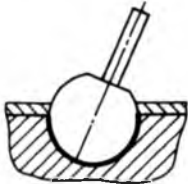
МПБ52 – представляет собой комплект баз, образованный сочетанием наружных поверхностей, включающих сложную поверхность или представляющий собой только сложную наружную поверхность.

В табл. 1.4.2 приведены результаты сопоставления типовых соединений ЕСДП с модулями соединения, из которой следует, что типовые соединения ЕСДП охватывают далеко не все разнообразие видов соединений, особенно, если принимать во внимание их конструктивные решения (в частности, отсутствует соединение МС5, часто встречающееся на практике). Многие из типовых соединений представляют частные случаи модулей соединения, например такие, как гладкое цилиндрическое, шлицевое и плоское соединения.

Таблица 1.4.2

Модуль соединения	Типовое соединение
МС1 	Шпоночное соединение
МС2 	Резьбовое цилиндрическое соединение
МС3 	Резьбовое коническое соединение

Продолжение табл. 1.4.2

Модуль соединения	Типовое соединение
MC4 	Гладкое цилиндрическое соединение (Неполный MC4) Шлицевое соединение (Неполный MC4)
MC5 	—
MC6 	Гладкое коническое соединение (Неполный MC6)
MC7 	Сферическое соединение

В соответствии с изложенным, создание банка типовых конструктивных решений модулей соединения представляется актуальной задачей.

1.4.4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МП И МС В ИЗДЕЛИЯХ

Статистический анализ МП и МС представляет большой научный и практический интерес, поскольку деталь рассматривается как совокупность МП. Информация о распределении в деталях и изделиях МП и МС по наименованиям, количеству, конструктивным формам, качественным характеристикам позволит глубже понять закономерности построения деталей и изделий. Это, в свою очередь, открывает путь к разработке научно обоснованного метода конструирования деталей и изделий, автоматизации их проектирования, типизации и унификации, что очень важно для построения эффективного производства деталей, сборки изделий, их контроля, создания высокоэффективного технологического оборудования, выбора наилучшей организационной формы производства.

Представляет большой интерес такой анализ и для конкретного предприятия. С помощью полученной информации в результате приведенного статистического анализа МП, МС можно наперед с достаточно высокой степенью точности определять ожидаемую трудоемкость изготовления деталей и сборки изделий, потребности в технологическом оборудовании и оснастке как по номенклатуре, так и по количеству, а отсюда и потребности в рабочей силе.

В результате исследований, проведенных под руководством автора, было рассмотрено свыше полутора тысяч различных деталей таких изделий, как центробежные насосы различных моделей, буровое трехшарошечное долото, турбодетандер, швейная машина, станки, штампы, коробка передач автомобиля и др. Результаты исследований представлялись в виде соответствующих гистограмм, показывающих распределение МП и МС.

Гистограммы строились следующим образом. После анализа чертежа сборочной единицы, куда входит исследуемая деталь, определялось служебное назначение каждой ее поверхности, и на основе этой информации поверхности объединялись в модули поверхностей. Далее по горизонтальной оси располагались 26 наименований МП, а по вертикальной оси – количество таких МП. Анализ гистограммы позволяет увидеть, какие наименования МП и в каком количестве присутствуют у детали, какова доля МПБ, МПР и МПС и др.

Гистограммы строились: для одной детали, для совокупности деталей одного изделия, для деталей, объединенных в группы по общности конструктивного оформления.

В ходе исследования проводилась оценка (в %) удельного веса МПБ, МПР, МПС как у совокупности деталей одного изделия, так и у совокуп-

ностей деталей разных изделий, у групп деталей разных по конструктивному оформлению. Были построены гистограммы, показывающие распределение МП по наименованиям у разных деталей.

В качестве примера на рис. 1.4.14 приведены гистограммы МП ряда деталей заднего моста автомобилей "Бычок-5301" и "ЗИЛ – 4331", коробки передач автомобиля "ЗИЛ-130" и передней оси автомобиля "Бычок-5301" [3]. Были отобраны 52 детали и разделены на две группы: тела вращения – 45 штук; детали корпусного типа – 7 штук (на рис. 1.4.14, а приведены гистограммы их МП).

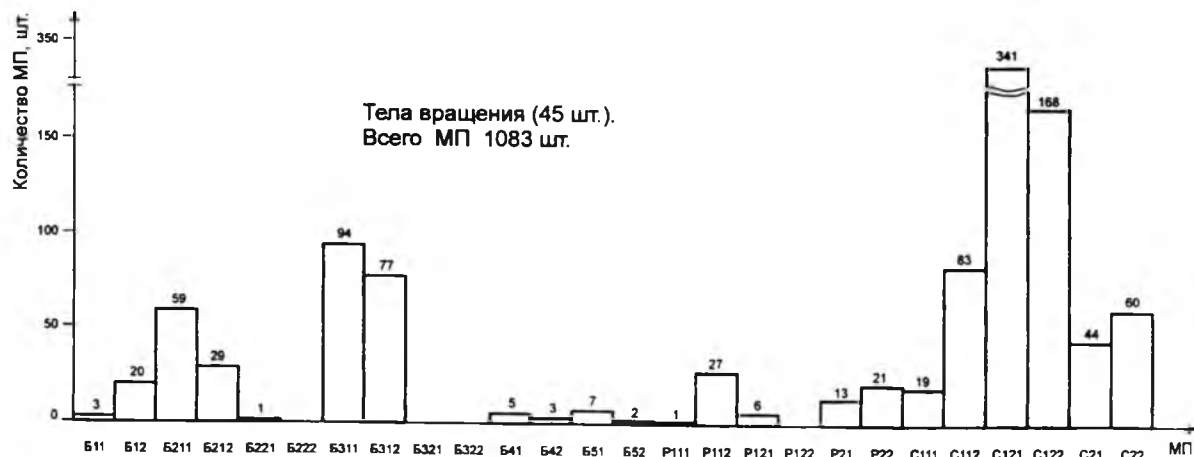
Результаты сопоставления характеристик перечисленных гистограмм приведены в табл. 1.4.3, в которой показано доленое (в %) и количественное содержание МПБ, МПР и МПС. В связи с тем, что в большинстве случаев наиболее высокие требования к качеству предъявляются к МПБ, последним при анализе было уделено большее внимание. В табл. 1.4.3 приведены также данные, характеризующие состав МПБ, доминирующие и отсутствующие МПБ.

Из анализа данных табл. 1.4.3 видно, что наибольшую часть составляют МПС, второе место по удельному весу занимают МПБ и на последнем месте – МПР. Последнее объясняется тем, что значительная часть деталей в изделиях не участвует в рабочем процессе, а потому у многих деталей отсутствуют МПР. Так, к примеру, из 52 рассмотренных деталей у 22 деталей МПР отсутствуют.

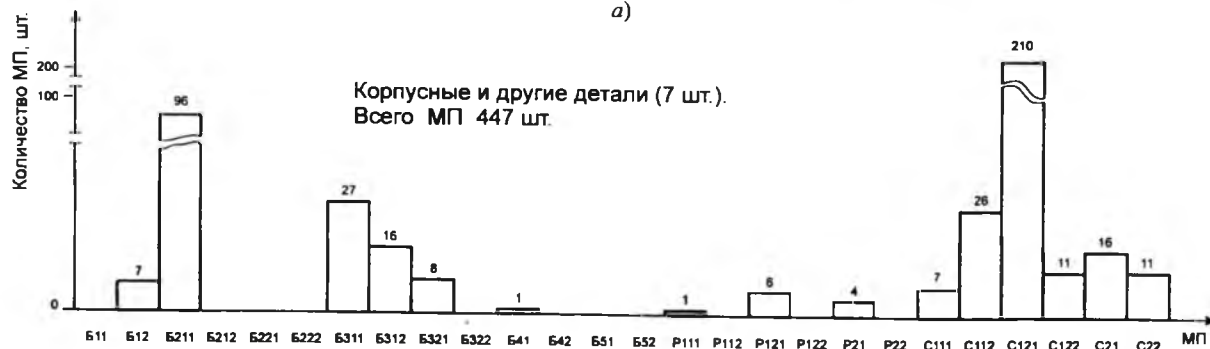
Можно также отметить разные соотношения между МПС, МПБ и МПР у разных групп деталей. Например, у корпусных деталей большую долю имеют МПБ и меньшую МПР, по сравнению с группой деталей типа тел вращения. Это объясняется, как уже отмечалось, тем, что корпусные детали служат, в основном, базовыми деталями для установки на них других деталей и узлов. С увеличением количества корпусных деталей в группе эта особенность будет проявляться еще ярче.

В обеих указанных группах деталей среди МПБ доминируют модули Б211 и Б311, а в группе деталей тел вращения – еще и Б212, Б312.

Во всех группах деталей, приведенных в табл. 1.4.3, отсутствуют модули Б222 и Б322. Отсутствие модуля Б322 объясняется тем, что он получается в результате сборки трех деталей: детали, содержащей плоскость, входящую в состав Б321, и двух "пальцев". Поэтому у детали, содержащей плоскость модуля Б322, сначала изготавливается модуль Б321, а затем, после сборки, получается модуль Б322. У деталей типа тел вращения отсутствует модуль Б321, так как базирование по такой схеме характерно, главным образом, для корпусных и плоских деталей.



а)



б)

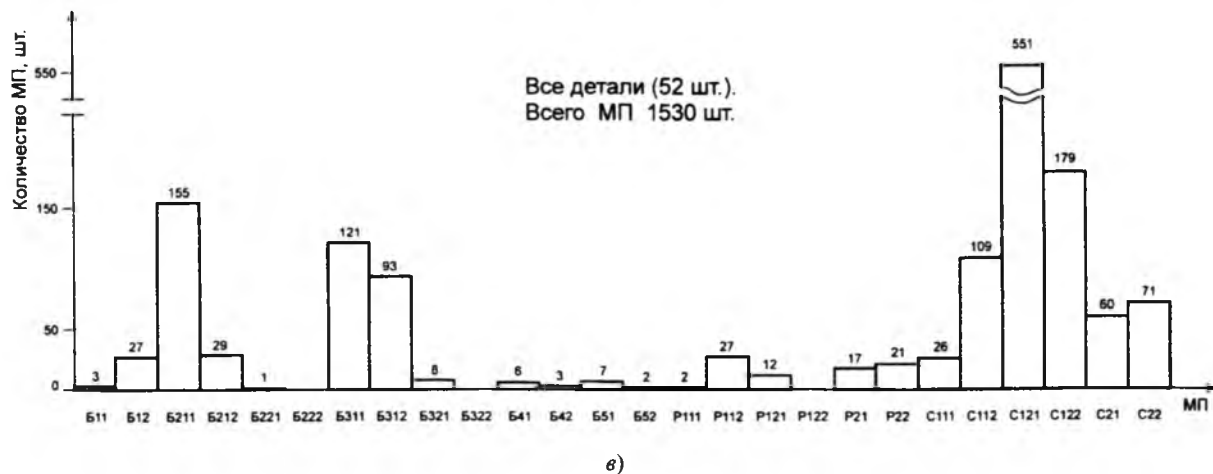


Рис. 1.4.14. Гистограммы МП деталей автомобиля:
а – деталей типа тел вращения; *б* – корпусных и других деталей;
в – всей совокупности деталей

Таблица 1.4.3

МП	Деталь													
	заднего моста 5301		заднего моста 4331		коробки передач 130		передней оси 5301		тела вращения (45 деталей)		корпусные (7 деталей)		все (52 детали)	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
МПБ	223	28	82	31	129	31	21	36	300	28	155	35	455	30
МПР	53	7	8	3	18	4	—	—	68	6	11	2	79	5
МПС	513	65	176	66	270	65	37	64	715	66	281	63	996	65
МП	Наименование МП													
Отсутствующие МПБ	Б222, Б322		Б11, Б12, Б221, Б222, Б322, Б41, Б42, Б52		Б221, Б222, Б322, Б42, Б52		Б11, Б12, Б212, Б221, Б222, Б321, Б322, Б41, Б42, Б51, Б52		Б222, Б321, Б322		Б11, Б12, Б221, Б222, Б322, Б41, Б42, Б51, Б52		Б222, Б322	
Доминирующие МПБ	Б211, Б311, Б312		Б311, Б211, Б212		Б312, Б211, Б311		Б211, Б311, Б312		Б311, Б312, Б211, Б212		Б211, Б311, Б312		Б211, Б311, Б312	
Общее число МП	789		266		417		58		1083		447		1530	

Это подтверждается и гистограммой МП (рис. 1.4.14, б), из которой следует, что у корпусных деталей модуль Б321 встречается 8 раз.

Сопоставлять количественно гистограммы МП деталей разных групп по полной номенклатуре модулей не представляется возможным из-за большой разницы объемов выборки. Например, в группу деталей типа тел вращения вошло 45 деталей, а в группу корпусных деталей – всего 7 деталей. Поэтому можно сделать лишь сопоставление (в процентном отношении) МПБ, МПР, МПС в каждой группе.

На рис. 1.4.15 приведена гистограмма, показывающая распределение наименований МП и их количества от детали к детали. Из гистограммы видно, что число наименований МП в 52 деталях колеблется от 3 до 11, а количество МП – от 3 до 122 штук.

Аналогичные исследования были проведены для деталей центробежных насосов и турбодетандера.

У центробежных насосов анализу были подвергнуты детали 22 центробежных насосов типа ЦН, ЦНА, ВН, ЭПЖ-2, ДПН и др. Была рассмотрена 6541 деталь, из них оригинальные составили 534 детали, общее число МП, содержащихся в этих деталях, составило 175 711 штук. Гистограммы МП строились для группы деталей типа тел вращения (5261 шт.), группы корпусных деталей (1280 шт.), включая и все другие детали и для всей совокупности деталей (рис. 1.4.16).

В состав группы деталей типа тел вращения вошли фланцы, втулки, валы, заглушки, цилиндры, обоймы, ниппели, колеса рабочие и т.п. В состав группы корпусных деталей вошли спираль корпуса, кронштейны, полуспирали верхняя и нижняя, планки, ребра, стойки.

У деталей турбодетандера для анализа были отобраны 60 оригинальных деталей турбодетандера; в их число вошли втулка, фланец, корпус, вал–шестерня, колесо рабочее, крыльчатка, стойка, шпиндель, корпус редуктора, лимб, ось, диск и др. Детали были разбиты на две группы: тела вращения (50 шт.) и остальные, состоящие из деталей корпусного типа, плоских и др. (10 шт.).

Для каждой группы деталей были построены гистограммы МП. На рис. 1.14.17 приведена гистограмма МП всей совокупности деталей.

В табл. 1.4.4 приведено сопоставление распределения МП у деталей автомобиля, центробежных насосов и турбодетандера; анализ показывает, что доминирует МПС, а наименьшую долю составляют МПР.

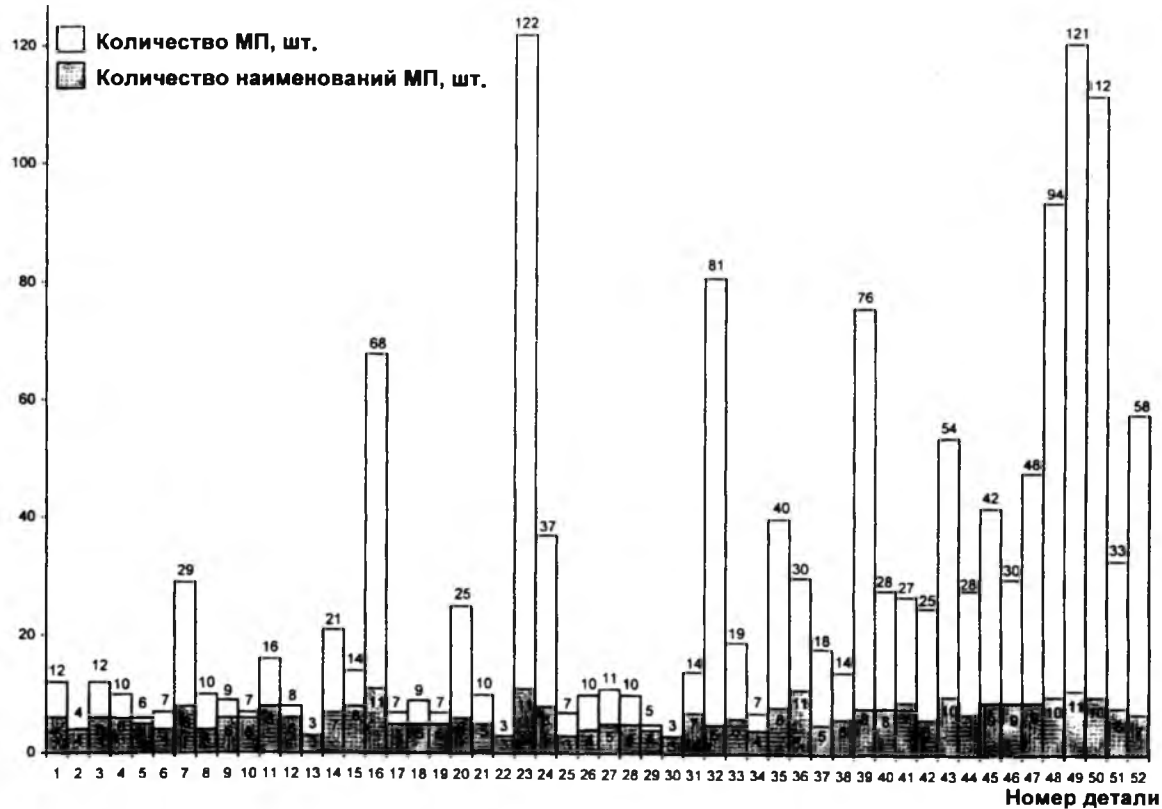


Рис. 1.4.15. Гистограмма количества МП и наименований МП в деталях автомобиля

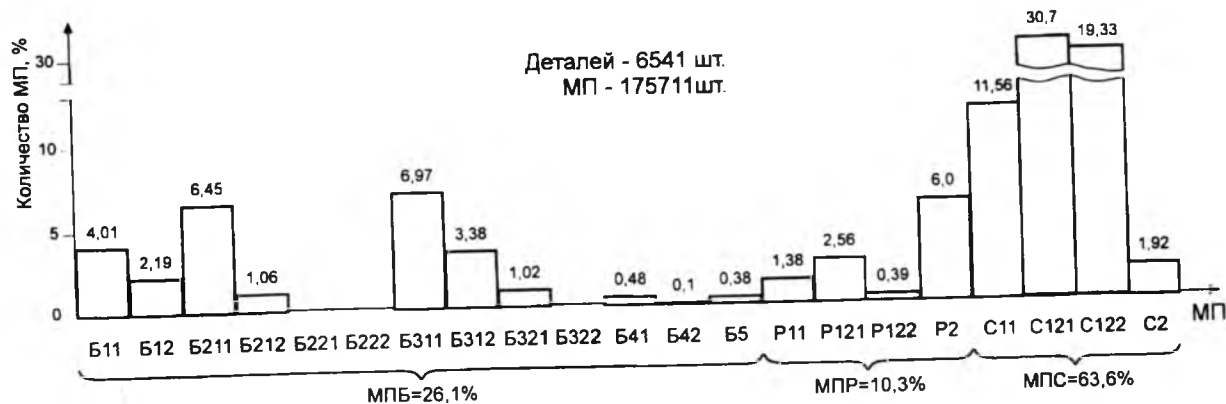


Рис. 1.4.16. Гистограмма МП всей совокупности деталей центробежных насосов

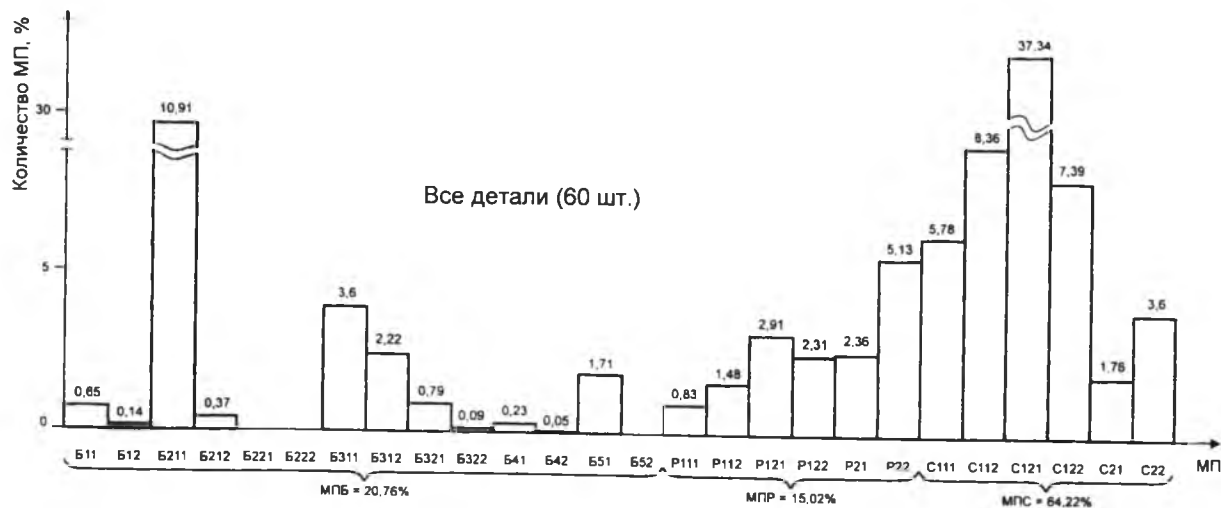


Рис. 1.4.17. Гистограммы МП всей совокупности деталей турбодетандера

Таблица 1.4.4

Изделие	Тела вращения			Корпусные детали			Все детали		
	МПБ	МПР	МПС	МПБ	МПР	МПС	МПБ	МПР	МПС
	%								
Центробежные насосы	22,1	11,2	66,7	48	5,5	46,5	26,1	10,3	63,6
Турбодетандер	17,93	21,71	60,36	25,98	2,52	71,50	20,76	15,02	64,22
Автомобиль	28	6	66	35	2	63	30	5	65

Пределы отклонений (в %)

Все изделия	От 17,93 до 28	От 6 до 21,71	От 60,36 до 66,7	От 25,98 до 48	От 2 до 5,5	От 46,5 до 71,50	От 20,76 до 30	От 5 до 15,02	От 63,6 до 65

Следует также отметить, что с позиций требований к качеству поверхностей МП, чаще наиболее высокие требования предъявляются к МПБ, в меньшей степени – к МПР, и наиболее низкие требования предъявляются к МПС, которые в своем большинстве получают на этапе формирования заготовки и дальнейшей обработке не подвергаются.

Представляет интерес исследование распределения МС на примере центробежных насосов, сверлильной головке, вырубном и гибочном штампах. На основе анализа сборочных чертежей перечисленных изделий были построены гистограммы МС (рис. 1.4.18), где по вертикальной оси откладывалось количество МС, а по горизонтальной оси – наименования МС. Из гистограмм на рис. 1.4.18, следует, что конструкция гибочного штампа из семи наименований МС содержит только четыре, сверлильная головка – шесть, вырубной штамп – три, а центробежные насосы (в зависимости от модели) содержат от двух до пяти наименований.

Результаты исследований показывают, что любая деталь может быть представлена совокупностью МП, а любое изделие – множеством МП и МС.

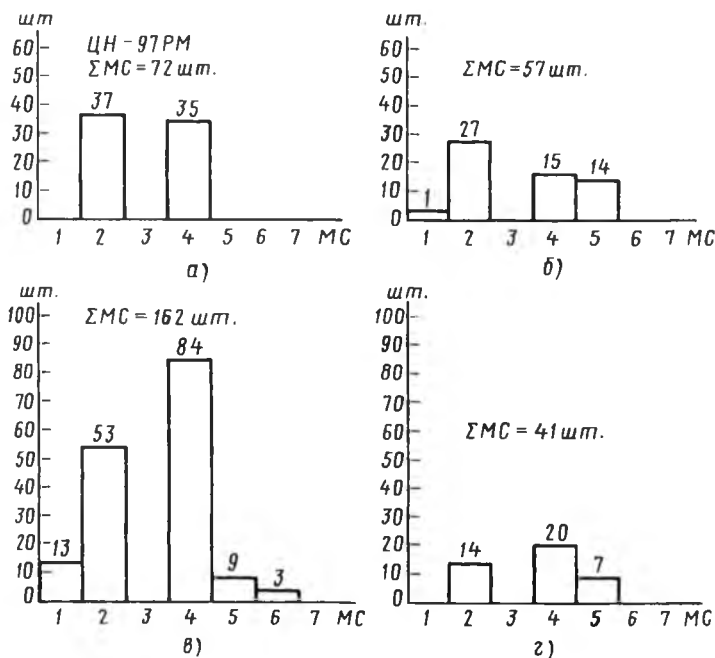


Рис. 1.4.18. Гистограммы МС:

а – двух моделей центробежных насосов; б – гибочного штампа;
 в – сверлильной головки; г – вырубного штампа

1.4.5. МЕТОД ОПИСАНИЯ ИЗДЕЛИЯ КАК ОБЪЕКТА ПРОИЗВОДСТВА

Информация об изделии, приводимая в конструкторской документации, с точки зрения его изготовления, с одной стороны, избыточна, что мешает поиску требуемой информации, а с другой – недостаточна. В связи с этим необходим такой метод описания изделия, который отражал бы в явном виде то, что необходимо технологу для разработки технологии изготовления изделия.

Эта задача решается посредством представления изделия структурированным множеством МП и МС. Состав МП, МС позволяет определить технологические переходы, необходимые для изготовления модулей, а структура множества устанавливает связи между модулями, их относительную ориентацию в детали и изделии, что необходимо для разработки технологических процессов изготовления деталей и сборки изделия.

В основе метода описания изделия структурированным множеством модулей лежит положение, что любое изделие представляет собой совокупность МП и МС.

В этом проявляется единство огромного разнообразия машиностроительных изделий; различие заключается в составе модулей, их характеристик и относительной ориентации модулей. На этой основе появляется возможность среди огромного разнообразия изделий установить закономерности строения изделий, являющиеся общими независимо от их назначения и конструктивного оформления, и разработать метод описания изделия, который позволял бы абстрагироваться от частных конкретных конструктивных решений, отражая их основные черты.

В основу такого метода должна быть положена схема замещения изделия структурированным множеством МП и МС изделия.

С этой целью изделие следует рассматривать как конструкцию, представляющую собой совокупность сборочных единиц и деталей, обезличенных по своему функциональному назначению, где каждая деталь – это подмножество МП, а образование любой сборочной единицы достигается с помощью соответствующих МС.

В качестве схемы замещения изделия воспользуемся графом иерархической структуры. Использование МП в качестве конечного элемента изделия позволит рассматривать последнее как упорядоченное множество модулей поверхностей в виде графа. Для этого надо построить три графа:

- граф сборочных единиц и деталей изделия;
- граф деталей изделия;
- граф МП и МС изделия.

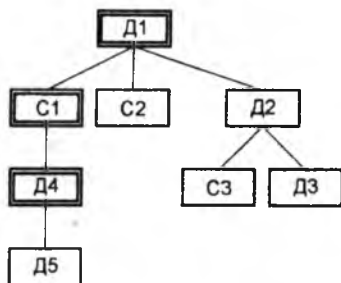


Рис. 1.4.19. Граф сборочных единиц и деталей изделия

Рассмотрим в качестве примера изделие, состоящее из трех сборочных единиц и пяти деталей.

Построение графа МП, МС изделия начинается с построения графа изделия как совокупности сборочных единиц (С) и деталей (Д). Для этого проводится анализ сборочного чертежа изделия, в результате которого устанавливаются связи между сборочными единицами и деталями и определяются, какие из них являются базирующими для других.

Граф строится следующим образом. На первом уровне (рис. 1.4.19) располагается базовая деталь изделия. На втором уровне располагаются детали и сборочные единицы, устанавливаемые на базовой детали; на третьем уровне располагаются детали и сборочные единицы, базой которых являются детали или сборочные единицы предыдущего уровня и т. д., до последней детали и сборочной единицы. Построенный таким образом граф показывает состав деталей и сборочных единиц, их относительное расположение и конструкторские базы.

Детали и сборочные единицы, являющиеся базами для других, отмечаются двойными линиями. Однако этот граф не отражает характер соединения деталей и сборочных единиц, являющийся одним из важных элементов конструкции изделия, которые влияют на его качество и во многом определяют технологический процесс сборки изделия.

Отсутствие этой информации в графе делает неполным представление об изделии. В связи с этим, чтобы установить все соединения деталей в изделии, надо заменить в графе сборочные единицы изделия совокупностями составляющих их деталей, установить конструкторские базы деталей и, таким образом, определить их иерархию.

Граф деталей каждой сборочной единицы строится по той же методике, что и предыдущий граф. На рис. 1.4.20 показан граф деталей изделия, где все сборочные единицы заменены соответствующими графами их деталей. На этом графе видна подчиненность деталей, а на ребрах указаны МС, с помощью которых происходит соединение соответствующих деталей.

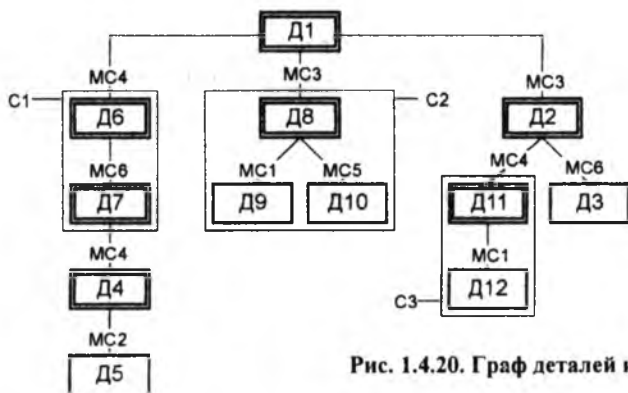


Рис. 1.4.20. Граф деталей изделия

Чтобы ввести в этот граф модули поверхностей, содержащиеся в деталях изделия, следует в нем представить каждую деталь структурированным множеством МП в виде соответствующего графа.

Граф МП детали строится следующим образом. Сначала на основе анализа сборочного чертежа определяется служебное назначение каждой поверхности детали, которые затем объединяются в соответствующие МП. Далее определяется МПБ, являющийся комплектом основных баз детали, и устанавливаются МП, служащие конструкторскими базами для других МП.

На основе этой информации строится граф, где на первом уровне располагается МПБ, выступающий в роли комплекта основных баз детали, на втором уровне размещаются МП, базой которых является МПБ первого уровня. На третьем уровне размещаются МП, базой которых являются МП второго уровня и т.д., до последнего МП.

На рис. 1.4.21 в качестве примера показан граф МП детали D5, где двойной линией показаны МП, являющиеся конструкторскими базами для других МП. Полученный граф МП детали показывает номенклатуру

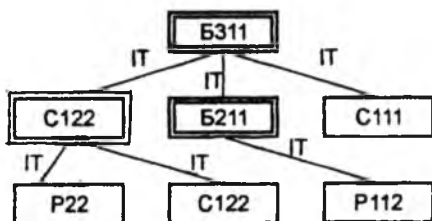


Рис. 1.4.21. Граф МП детали D5 (см. рис. 1.4.19)

и число МП, входящих в состав детали, их конструкторские размерные связи, а приведенные на ребрах графа значения качества или допуска характеризуют уровень точности положения каждого МП относительно его конструкторской базы. Заменяя в предыдущем графе все детали графами МП, получим граф МП и МС всего изделия, приведенный на рис. 1.4.22.

С целью достижения большей компактности в графе (рис. 1.4.22) указаны только номера МП; их расшифровка должна указываться в отдельной таблице.

Таким образом, представление изделия ориентированным множеством МП, МС позволяет абстрагироваться от его конкретного служебного назначения, конструктивного оформления и перейти к описанию содержания через состав МП и МС и внутренние связи между ними.

Использование такого графа позволяет получать информацию о структуре изделия, подчиненности сборочных единиц, деталей, МП, МС, о конструкторских базах, характере размерных связей, уровню их точности и др.

Наличие классификаций МП, МС, где отличительными признаками являются их конструктивное оформление, размеры, требования к геометрической точности, качеству поверхностного слоя, позволит по графу установить не только номенклатуру МП, МС, но и характеристики, определяющие технологию изготовления модулей.

Однако представление изделия графом имеет ряд таких неудобств, как необходимость в большом пространстве, большой объем графической информации (даже для изделий небольшой сложности), что делает граф труднообозримым. Поэтому всю информацию с графа изделия (с целью удобства ее оценки и анализа) целесообразно представить в более удобном и емком виде, например, в виде таблиц. Получение конечного графа, описывающего изделие на модульном уровне, осуществляется последовательным построением трех графов. Следовательно, и метод описания изделия должен включать эти этапы.

В общем случае граф иерархической структуры – это совокупность узлов, связанных ребрами. Для описания информации об изделии, получаемой с помощью графа, можно воспользоваться такими его характеристиками как количество уровней, количество узлов на одном уровне и в ветви, разновидности ветвей и др. Перечисленные характеристики графа могут нести разную информацию в зависимости от того, множество каких объектов изделия он отражает. Если воспользоваться этими характеристиками, то информацию с графа можно записать в табличной форме.

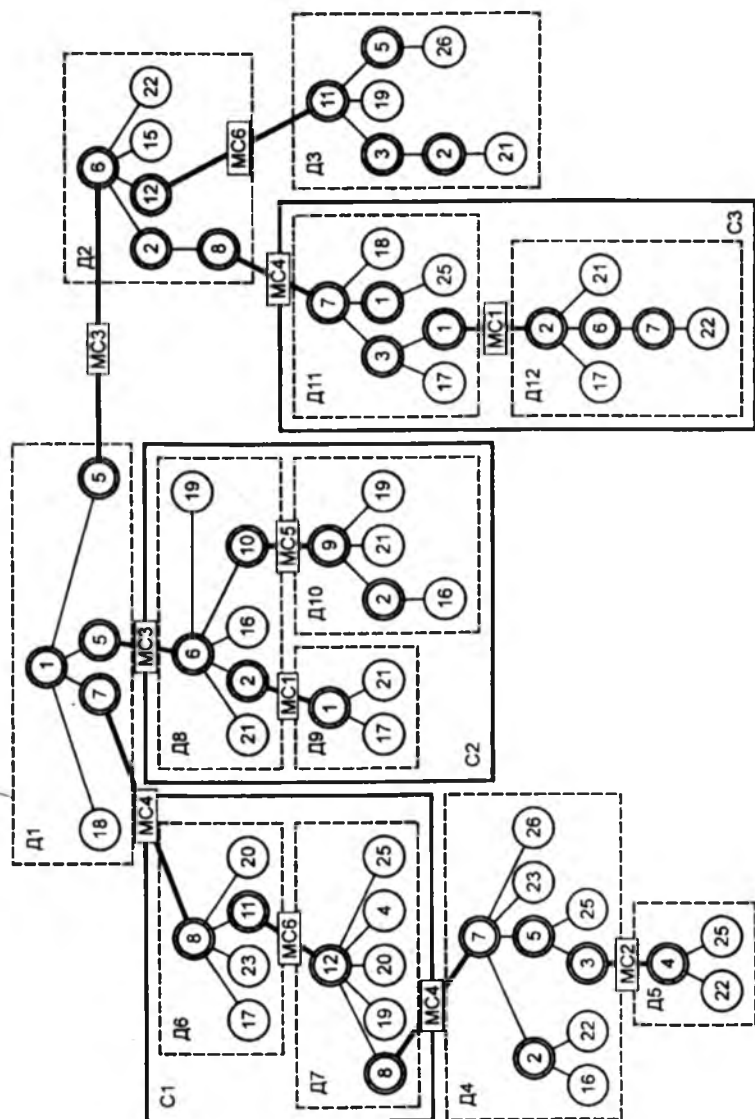


Рис. 1.4.22. Граф МП, МС изделия

Таблица графа должна отражать состав сборочных единиц, деталей, МП, МС; состав сборочной единицы, состав МП каждой детали, конструкторские базы, иерархию сборочных единиц, деталей и МП.

Рассмотрим представление информации с графа МП, МС изделия, содержащего три сборочные единицы и пять деталей (см. рис. 1.4.22), в табличной форме.

Граф 1 изделия, представленного совокупностью сборочных единиц и деталей, изображен на рис. 1.4.19. Обозначим уровень графа буквой A , двойной линией – детали и сборочные единицы, выступающие в качестве баз для других деталей или сборочных единиц; тогда информацию о графе сборочных единиц и деталей изделия можно записать в таблицу следующим образом.

Базовой деталью изделия, как следует из графа, является деталь $D1$. Поэтому в табл. 1.4.5 в графе "Деталь" на уровне $A1$ записывается $D1$. Надо отметить, что в общем случае в качестве базовой детали изделия может выступать и сборочная единица; в этом случае она будет записана в графе "сборочная единица".

Как следует из графа (см. рис. 1.4.19), на втором уровне располагаются сборочные единицы $C1$ и $C2$ и деталь $D2$. Поэтому на втором уровне ($A2$) в графе "Сборочная единица" записываются $C1$ и $C2$, а в графе "Деталь" – $D2$. На графе видно, что базой $C1$, $C2$ и $D2$ является деталь $D1$. Чтобы отразить эту информацию при занесении сборочных единиц и деталей в таблицу, они записываются в виде дроби. В числителе указываются сборочные единицы и детали i -го уровня, а в знаменателе – их база, в качестве которой выступает деталь или сборочная единица предыдущего уровня ($i - 1$). Таким способом заполняются все уровни табл. 1.4.5.

Таблица 1.4.5

Уровень	Сборочная единица	Деталь
$A1$	–	$D1$
$A2$	$C1/D1, C2/D1$	$D1/D2$
$A3$	$C3/D2$	$D3/D2, D4/C1$
$A4$	–	$D5/D4$
$\Sigma A = 4$	$\Sigma C = 3$	$\Sigma D = 5$

ΣA – количество уровней; ΣC – количество сборочных единиц; ΣD – количество деталей в изделии.

Эта таблица показывает, что структура изделия состоит из четырех уровней, содержит три сборочные единицы и пять деталей. На первом уровне расположена деталь *Д1*, на втором уровне – сборочная единица *С1*, сборочная единица *С2* и деталь *Д2*, и у всех базой является деталь *Д1* с первого уровня. На третьем уровне расположены сборочная единица *С3* и детали *Д3*, *Д4*; базой сборочной единицы *С3* и детали *Д3* является деталь *Д2* со второго уровня, а базой детали *Д4* является сборочная единица *С1*. На четвертом уровне расположена деталь *Д5* с базой детали *Д4* с третьего уровня.

Аналогично заполняются и таблицы второго и третьего графов.

Рассмотрим заполнение табл. 1.4.6 графа деталей изделия, представленного на рис. 1.4.20. При заполнение таблицы такого графа деталь, входящая в сборочную единицу, может располагаться на одном уровне графа сборочной единицы, а на графе изделия – на другом уровне.

Это различие должно найти отражение при заполнении таблицы. В связи с этим условимся разными буквами обозначать уровни разных графов. Для графа сборочных единиц и деталей изделия уровни обозначим, как условились ранее, буквой *А*, для графа деталей сборочной единицы – буквой *Б*, и для графа деталей изделия – буквой *В*, и для графа МП, МС изделия – буквой *Г*.

Информация с графа 2 (см. рис. 1.4.20) представлена в табл. 1.4.6. В ней рядом с дробным изображением двух деталей, в круглых скобках указан МС, по которому они соединяются.

Таблица 1.4.6

Уровень	Деталь
<i>В1</i>	<i>Д1</i>
<i>В2</i>	<i>Д6/Д1</i> (МС4); <i>Д8/Д1</i> (МС3); <i>Д2/Д1</i> (МС3)
<i>В3</i>	<i>Д7/Д6</i> (МС6); <i>Д9/Д8</i> (МС1); <i>Д10/Д8</i> (МС5); <i>Д11/Д2</i> (МС4); <i>Д3/Д2</i> (МС6)
<i>В4</i>	<i>Д4/Д7</i> (МС4); <i>Д12/Д11</i> (МС1)
<i>В5</i>	<i>Д5/Д4</i> (МС2)
$\Sigma В = 5$	$\Sigma Д = 12$; МС1 = 2; МС2 = 1; МС3 = 2; МС4 = 3; МС5 = 1; МС6 = 2; $\Sigma МС = 11$

Таблица 1.4.7

Уровень	Деталь
Сборочная единица С1	
Б1	Д6
Б2	Д7 / Д6
$\Sigma Б = 2$	$\Sigma Д = 2$
Сборочная единица С2	
Б1	Д8
Б2	Д9 / Д8; Д10 / Д8
$\Sigma Б = 2$	$\Sigma Д = 3$
Сборочная единица С3	
Б1	Д11
Б2	Д12 / Д11
$\Sigma Б = 2$	$\Sigma Д = 2$

В табл. 1.4.7 представлена информация о сборочных единицах С1, С2, С3, входящих в состав изделия. Информация с графа деталей сборочной единицы записывается в таблицу аналогично табл. 1.4.6.

Как следует из графа 2, изделие содержит 12 деталей, расположенных на пяти уровнях, а номенклатура МС ограничена шестью наименованиями.

Из графа 2 (см. рис. 1.4.20) видно, что структура изделия содержит пять ветвей:

$Д1 - Д6 - Д7 - Д4 - Д5,$
 $Д1 - Д8 - Д9,$
 $Д1 - Д8 - Д10,$
 $Д1 - Д2 - Д11 - Д12,$
 $Д1 - Д2 - Д3.$

Наибольшая ветвь содержит 5 деталей, а наименьшая – 3 детали. Из них ветви 2 и 3 и ветви 4 и 5 параллельно связаны, так как имеют общие детали – в первой паре Д1 и Д8, а во второй паре Д1 и Д2. Эта информация важна для разработки технологического процесса сборки.

Для получения информации об изделии как объекте производства на этапе построения графа 2 следует ввести дополнительную информацию о характеристиках деталей изделия, которая заносится в отдельную табли-

цу. К таким характеристикам, в первую очередь, относятся конструктивный вид детали (корпусная, тело вращения и т.п.), габаритные размеры, марка материала с указанием характеристики обрабатываемости материала и др.

Эта информация дает представление технологу о возможных методах обработки, требуемом инструменте и технологическом оборудовании для изготовления деталей.

В табл. 1.4.8 приведено описание графа МП, МС. Читать его надо следующим образом:

МП1 расположен на 1-м уровне графа 3, он входит в состав детали 1, расположенной на 1-м уровне графа 2 и на первом уровне графа 1;

МП18 расположен на 2-м уровне графа 3, входит в состав детали 1, расположенной на 1-м уровне графа 2 и на 1-м уровне графа 1;

МП7 расположен на 2-м уровне графа 3, участвует в модуле соединения МС4 и входит в состав детали 1, расположенной на 1-м уровне графа 2 и на 1-м уровне графа 1;

два МП5 расположены на 2-м уровне графа 3, участвуют в МС3 и входят в состав детали 1, расположенной на 1-м уровне графа 2 и на 1-м уровне графа 1;

МП8 расположен на третьем уровне графа 3, участвует в МС4, входит в состав детали 6, расположенной на 2-м уровне графа 2, входящей в состав сборочной единицы С1 на 1-м уровне;

Таблица 1.4.8

Уровень	МП
Г1	МП1 (Д1, В1) А1
Г2	МП18 (Д1, В1) А1; МП7 (МС4) (Д1, В1) А1; МП5 (МС3) (Д1, В1) А1; МП5 (МС3) (Д1, В1) А1
Г3	МП8 (МС4) (Д6, В2) (С1, Б1) А2; МП6 (МС3) (Д8, В2) (С2, Б1) А2; МП6 (МС3) (Д2, В2) А2
Г4	МП17 (Д6, В2) (С1, Б1) А2; МП23 (Д6, В2) (С1, Б1) А2; МП11 (МС6) (Д6, В2) (С1, Б1) А2; МП20 (Д6, В2) (С1, Б1) А2; МП21 (Д8, В2) (С2, Б1) А2; МП2 (МС1) (Д8, В2) (С2, Б1) А2; МП16 (Д8, В2) (С2, Б1) А2; МП10 (МС5) (Д8, В2) (С2, Б1) А2; МП19 (Д8, В2) (С2, Б1) А2; МП2 (Д2, В2) А2; МП12 (МС6) (Д3, В2) А2; МП15 (Д2, В2) А2; МП22 (Д2, В2) А2
Г _г	—

сборочная единица С1 расположена на 2-м уровне графа 1; таким образом, деталь 6 участвует в составе графа 1 через сборочную единицу С1.

Аналогично описываются остальные модули поверхностей.

Как следует из изложенного, граф МП, МС изделия дает всю информацию, представленную предыдущими графами 1 и 2, так как на нем указаны и сборочные единицы, и детали изделия, и МС. Дополнительно граф 3 показывает состав МП всего изделия и каждой детали в отдельности. Поэтому для получения информации об изделии как объекте производства достаточно в сопроводительной документации указывать только один последний граф 3. Что касается графов 1 и 2, то они могут быть приведены только для облегчения изучения изделия. Это становится актуальным, когда изделие содержит значительное число деталей и сборочных единиц.

Не менее важной информацией об изделии является знание о размерных цепях. Как отмечалось в гл. 1.3, выявление размерных цепей, заложенных в конструкции изделия, является достаточно сложной и трудоемкой задачей, не поддающейся автоматизации. Представление изделия в виде графа МП, МС существенно упрощает процесс выявления размерных цепей и открывает путь к его формализации и автоматизации.

На графе 2 деталей изделия (рис. 1.4.23) показаны контуры конструкторских размерных цепей. Пусть, к примеру, в качестве технических требований на изделие требуется обеспечить заданную точность относительного положения деталей Д5, Д9 и деталей Д10, Д11. Обозначим эти положения указанных деталей замыкающими звеньями соответственно

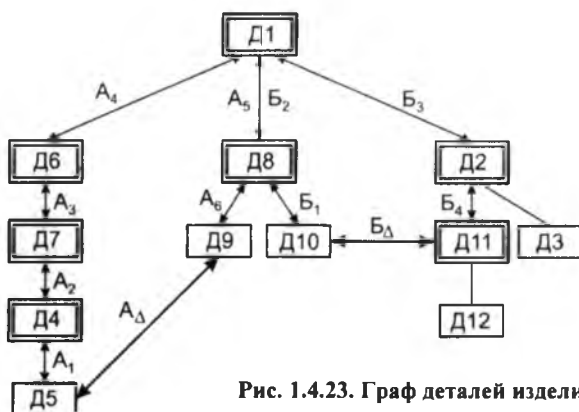


Рис. 1.4.23. Граф деталей изделия с размерными цепями

A_Δ и B_Δ , как это показано на рис. 1.4.23. С помощью графа 2 без сборочного чертежа изделия легко построить контуры их размерных цепей. Для этого сначала надо принять ребра, соединяющие смежные детали, за звенья размерных цепей, как это показано на рис. 1.4.23, но это еще не размеры деталей, являющиеся составляющими звеньями размерной цепи, а лишь линии, связывающие детали, чьи размеры являются составляющими звеньями.

На графе 2 можно видеть характер размерных цепей, их взаимосвязи. Например, размерные цепи A и B являются параллельно связанными цепями, так как имеют общее звено A_5B_2 и содержат соответственно шесть и четыре составляющих звена. Зная величину допуска на замыкающее звено, можно определить величину среднего допуска $T_{ср}$ на составляющие звенья. Чтобы их заменить на размеры между МП, надо воспользоваться графом МП, МС изделия (рис. 1.4.24). Для этого надо за расстояние между двумя деталями принять размеры, определяющие положение двух МП, принадлежащих деталям, образующим звено размерной цепи. В качестве примера найдем размеры, являющиеся составляющими звеньями размерной цепи A . На графе 3 видны МП, которыми соединяются детали, образуя МС:

детали $D1$ и $D6$ соединяются модулями МП7 с МП8, образуя МС4;
 детали $D6$ и $D7$ – модулями МП11 с МП12, образуя МС6;
 детали $D7$ и $D4$ – модулями МП8 с МП7, образуя МС4;
 детали $D4$ и $D5$ – модулями МП3 с МП4, образуя МС2;
 детали $D1$ и $D8$ – модулями МП5 с МП6, образуя МС3;
 детали $D8$ и $D9$ – модулями МП2 с МП1, образуя МС1;
 детали $D8$ и $D10$ – модулями МП10 и МП9, образуя МС5;
 детали $D1$ и $D2$ – модулями МП5 с МП6, образуя МС3;
 детали $D2$ и $D11$ – модулями МП8 и МП7, образуя МС4;
 детали $D11$ и $D12$ – модулями МП1 с МП2, образуя МС1.

После совмещения МПБ, образующих МС, составляющими звеньями размерной цепи A будут размеры этих деталей, определяющие расстояние между соответствующими МПБ, один из которых является комплектом основных баз детали, а другой МП – комплектом вспомогательных баз, с помощью которого присоединяется к этой детали другая деталь.

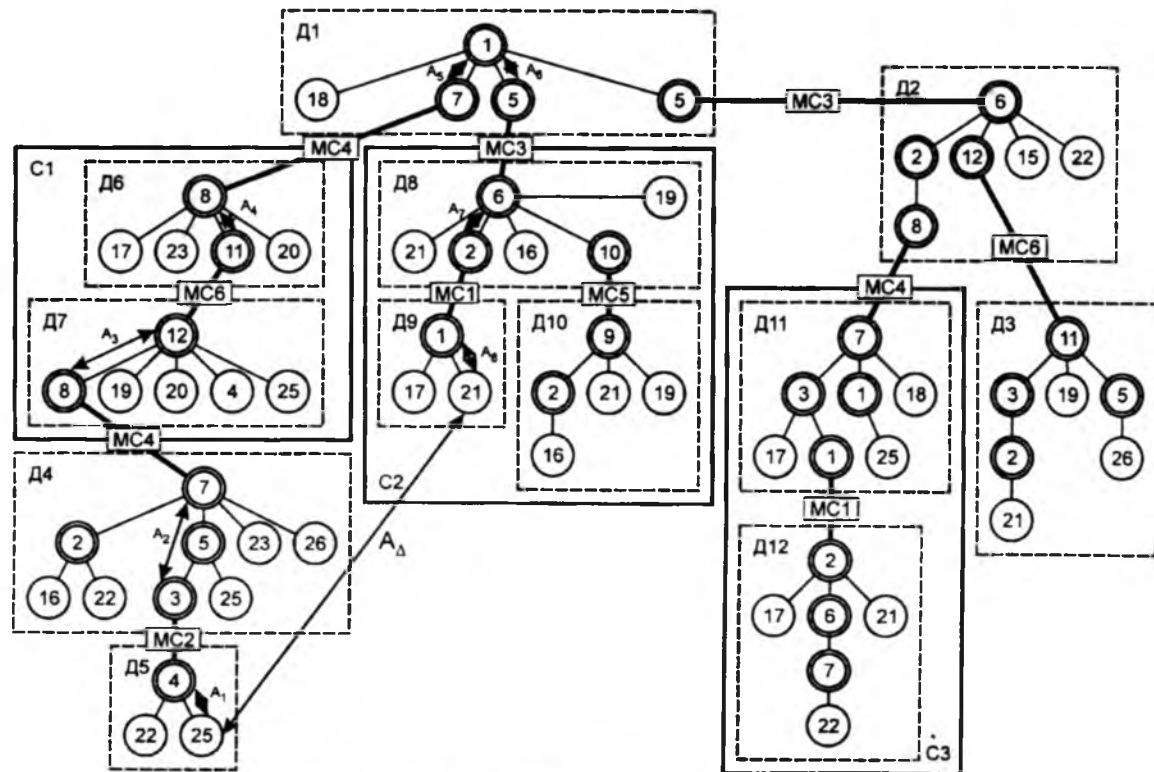


Рис. 1.4.24. Граф МП, МС изделия с размерной цепью

На примере размерной цепи A ее звенья, как расстояния между соответствующими МП, показаны на графе 3 (рис. 1.4.24), где:

A_{Δ} – расстояние между МП21 ($D9$) и МП25 ($D5$),

A_1 – расстояние между МП25 ($D5$) и МП4 ($D5$),

A_2 – расстояние между МП3 ($D4$) и МП7 ($D4$),

A_3 – расстояние между МП8 ($D7$) и МП12 ($D7$),

A_4 – расстояние между МП11 ($D6$) и МП8 ($D6$),

A_5 – расстояние между МП7 ($D1$) и МП1 ($D1$),

A_6 – расстояние между МП1 ($D1$) и МП5 ($D1$),

A_7 – расстояние между МП6 ($D8$) и МП2 ($D8$),

A_8 – расстояние между МП1 ($D9$) и МП21 ($D9$).

Отсюда следует, что размерная цепь A содержит восемь составляющих звеньев. Зная величину допуска на замыкающее звено, можно определить величину среднего допуска на составляющие звенья.

Число составляющих звеньев увеличилось на два звена.

В заключение можно отметить, что с помощью графов и приведенных таблиц технолог сравнительно быстро получает достаточно подробное и наглядное представление об изделии как объекте производства, а именно: о структуре изделия, степени его сложности, количестве сборочных единиц, деталей, МП, МС, размерных цепях, их характеристиках и др.

Особенно актуален такой метод описания изделия в условиях автоматизации технологической подготовки производства. Пользуясь изложенной методикой, можно любое машиностроение описать в виде структурированного множества МП и МС. Рассмотрим применение методики на примере бурового долота.

1.4.6. ОПИСАНИЕ БУРОВОГО ТРЕХШАРОШЕЧНОГО ДОЛОТА В МОДУЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Буровое трехшарошечное долото является породоразрушающим инструментом при бурении скважин. Оно состоит (рис. 1.4.25) из трех секций, каждая из которых содержит лапу 1, опорный подшипник, состоящий из двух наборов цилиндрических роликов 2, 3 и набора шариков 4, насадку 5 гидромониторного канала, замковый палец 6 и шарошку 7 с зубками в количестве 28 штук. Лапа каждой секции представляет собой сектор в виде двугранного угла в 120° , вследствие чего три соединенные лапы образуют в поперечном сечении круг, а наборы роликов и шариков образуют соответствующие подшипники. В процессе бурения скважины долото вращается и совершает поступательное движение, одновременно вращаются и шарошки, разрушая породу.

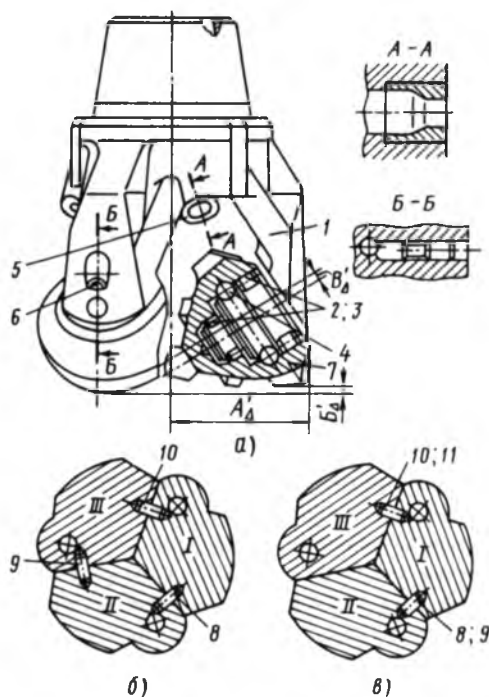


Рис. 1.4.25. Буровое трехшарошечное долото:

а – общий вид; *б* – схема базирования секций долота с помощью трех штифтов; *в* – схема базирования секций долота с помощью двух пар штифтов 8, 9 и 10, 11

Для описания долота в модульном исполнении сначала строится граф 1 его сборочных единиц и деталей. Построение должно начинаться с определения базовой детали, однако конструкция трехшарошечного бурового долота отличается отсутствием базовой детали, поэтому его называют бескорпусным долотом. Такое решение объясняется дефицитом пространства, в которое должно вписываться долото.

Как следует из сборочного чертежа, отсутствие базовой детали у долота привело к дефекту его конструкции, заключающемуся в наличии степеней свободы у каждой секции. Действительно, секции в долоте соединяются друг с другом посредством совмещения плоскостей двугранного угла их лап. Такое базирование секций оставляет каждой из них два перемещения на плоскости двугранного угла лапы и одно вращение вокруг оси, перпендикулярной к плоскости двугранного угла.

Неподвижность секций долота достигается их сваркой в стыках лап. Чтобы осуществить сварку секций, необходимо предварительно их сориентировать относительно друг друга, для чего в конструкцию долота введены три технологических штифта цилиндрической формы, с помощью которых соединяются все секции.

Относительная ориентация секций долота и обеспечение постоянства их положения до сварки осуществляется следующим образом. Одну из секций условно выбирают в качестве базовой и к ней присоединяют вторую секцию, а ко второй секции присоединяют третью секцию.

Чтобы построить граф 1 долота, надо знать подчиненность всех деталей долота, а для этого необходимо установить схемы базирования каждой детали и сборочной единицы. В результате ввода трех технологических штифтов базирование одной секции относительно другой осуществляется по плоскости двугранного угла и цилиндрическому штифту (рис. 1.4.25, б). Контакт по плоскости лишает секцию трех степеней свободы, а контакт с цилиндрическим штифтом – двух степеней свободы. В итоге у каждой секции остается по одной степени свободы – вращение вокруг цилиндрического штифта. Следовательно, имеют место неполные комплекты основных и вспомогательных баз. Наличие указанных степеней свободы затрудняет фиксирование положения секций перед сваркой. С целью облегчения фиксации секций относительно друг друга введен третий штифт, соединяющий первую и третью секции. Однако введение третьего штифта нарушает правило шести точек, согласно которому для лишения шести степеней свободы необходимо и достаточно шести опорных точек. С вводом третьего штифта количество базирующих точек увеличивается до девяти, а какие шесть из них будут образовывать фактическую схему базирования, зависит от случайных причин.

Избыточное число базирующих точек приводит к следующему. На сборку поступают лапы с погрешностями расположения осей отверстий под штифты, диаметров отверстий и штифтов относительно друг друга. Из-за погрешностей при монтаже секции *III* третий штифт может не войти в отверстие лапы этой секции. В этом случае его ввод в отверстие нарушит контакт плоскостей двугранных углов лап секций *II* и *III*. С тем, чтобы избежать этого и обеспечить прилегание плоскостей лап, зазор в штифтовом соединении третьего штифта увеличивают. Однако увеличение зазора снижает точность базирования.

Таким образом, введением третьего штифта добились лишь облегчения соединения секций в долото, но при этом относительная подвижность секций сохранилась.

Указанная неопределенность базирования, как уже отмечалось, затрудняет установление фактических схем базирования секций в долоте. Поэтому при построении графа 1 были приняты следующие условия. За базовую деталь 1 долота была принята лапа одной из трех секций, которую будем в дальнейшем считать секцией I, все детали этой секции будем считать принадлежащими непосредственно долоту. Дальнейшая подчиненность деталей долота определяется следующим образом. В лапу I вставляется технологический штифт 8 (рис. 1.4.25, б) и они вместе образуют неполный комплект баз для секции II (сборочная единица C1). В свою очередь лапа секции II со вставленным в нее технологическим штифтом 9 образуют неполный комплект баз для секции III (сборочная единица C2), а третий технологический штифт 10 входит одновременно в лапы секций III и I.

При таком базировании графа 1 (рис. 1.4.26) долота видна структура долота, состоящего из двух сборочных единиц – C1 и C2, двух наборов роликов 2, 3 и одного набора шариков 4, насадки 5 гидромониторного канала, замкового пальца 6, шарошки 7 и трех технологических штифтов 8, 9, 10 и зубков 11...38.

Поскольку опорный подшипник состоит из двух наборов цилиндрических роликов и набора шариков, и каждый из перечисленных элементов в одном наборе имеет одинаковую схему базирования, то на графе 1 все они, находящиеся в одном наборе, имеют один номер.

Как следует из графа 1, базой C1 являются детали 1 и 8, базой C2 – сборочная единица C1 и деталь 9, а деталь 10 одновременно связана со сборочной единицей C2 и деталью 1. Наличие третьего штифта 10 приводит к тому, что C2 превращается в его конструкторскую базу и деталь 10

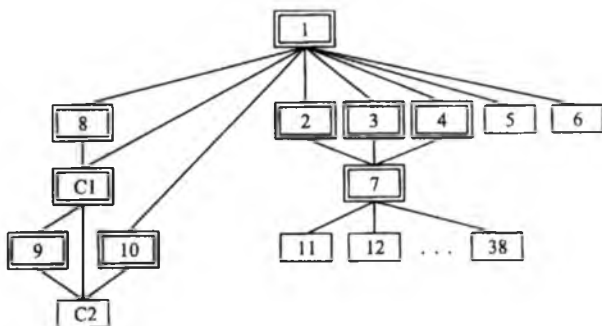


Рис. 1.4.26. Граф 1 бурового трехшарошечного долота с тремя штифтами

оказывается одновременно принадлежащей двум деталям. Этот конструктивный недостаток приводит к нарушению структуры графа, когда *C2* имеет лишнюю связь. Отсюда следует, что анализ структуры графа может показывать ошибки в конструкции изделия.

Чтобы устранить этот недостаток долота, было решено внести изменения в его конструкцию. В качестве базовой детали долота была принята лапа *I* секции *I* и, для обеспечения определенности базирования на ней, секций *II* и *III*; у базовой детали (лапа *I*) на каждой плоскости ее двугранного угла было смонтировано по паре штифтов *8*, *9* и *10*, *11*. При этом в каждой паре штифтов один штифт является цилиндрическим, а другой – срезанным. Таким образом, каждая плоскость двугранного угла базовой лапы *I* вместе с парой штифтов (см. рис. 1.4.25, *в*) образуют два полных комплекта вспомогательных баз (*B322*), а две другие лапы имеют по одному ответному полному комплекту основных баз (*B321*), с помощью которого присоединяются к первой лапе. Базируясь по ним, секции *II* и *III* лишаются всех степеней свободы. С учетом этих изменений граф *1* теперь принял вид, представленный на рис. 1.4.27. Как видно из графа *1*, характерной чертой долота является то, что деталь *7* устанавливается на комплект вспомогательных баз, образованных поверхностями трех деталей (триа подшипниками: двумя роликовыми и одним шариковым).

В соответствии с графом *1* (рис. 1.4.27) была составлена табл. 1.4.9, в которой дано описание информации с графа *1*.

Следующим шагом является построение графа *2* деталей долота, для чего каждая сборочная единица представляется графом их деталей.

Таблица 1.4.9

Уровень	Сборочная единица	Деталь
<i>A1</i>	–	<i>1</i>
<i>A2</i>	–	<i>8/1; 9/1; 2/1; 3/1;</i> <i>4/1; 5/1; 6/1; 10/1; 11/1</i>
<i>A3</i>	<i>C1/1, 8, 9; C2/1, 10, 11</i>	<i>7/2, 3, 4</i>
<i>A4</i>	–	<i>12/7; 13/7; ... 39/7</i>

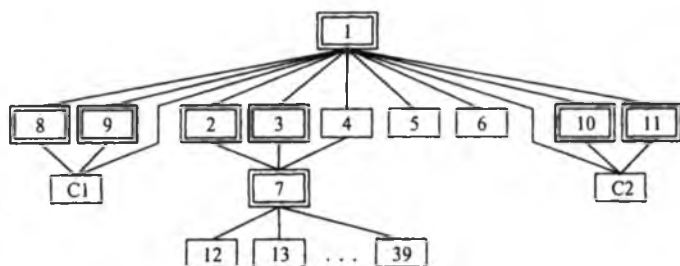


Рис. 1.4.27. Граф 1 бурового трехшарошечного долота с двумя парами штифтов

Сборочная единица C1 состоит из базовой детали – лапы 40 и смонтированных на ней двух наборов цилиндрических роликов 41, 42, набора шариков 43, насадки 44 гидромониторного канала, замкового пальца 45 и шарошки 46 с 28 зубками (от 47 до 74). Сборочная единица C2 содержит тот же состав деталей – лапу 75 (базовая деталь), два набора цилиндрических роликов 76, 77, набор шариков 78, насадку 79 гидромониторного канала, замковый палец 80 и шарошку 81 с 28 зубками (от 82 до 109), как это видно на графе 2 (рис. 1.4.28).

Теперь установим все MC, с помощью которых соединяются детали долота, и укажем их на ребрах графа 2. Как цилиндрический, так и срезанный штифты соединяются с лапой 1 путем совмещения модуля Б311 лапы 1 с модулем Б312 штифта, образуя MC4. При этом надо отметить, что модули Б311 и Б312 являются неполными комплектами баз и совмещаются по неподвижной посадке. Эта неопределенность базирования в условиях неподвижной посадки не влияет на построение графа 2. С помощью MC4 соединяется и каждый зубок с шарошкой.

Чтобы определить модули соединения роликов и шариков с цапфой лапы и шарошкой, необходимо провести анализ их базирований.

Если рассматривать базирование каждого ролика, то он как подвижный элемент имеет линейный контакт с цапфой и лишен только двух степеней свободы. Аналогично и шарик лишен только одной степени свободы, так как контакт его с цапфой носит точечный характер.

Принимая во внимание, что совокупность роликов и шариков образуют подшипники, условимся рассматривать набор роликов как втулку, состоящую из бесконечно большого числа роликов, а набор шариков как кольцо, состоящее из бесконечно большого числа шариков. Тогда соединение набора роликов с цапфой будет представлять собой совмещение отверстия втулки с цапфой. Отсюда два набора цилиндрических роликов

и набор шариков образуют "втулку", которая своим отверстием и буртиком (кольцо из шариков) составят модуль Б311 в виде неполного комплекта баз. Это означает, что "втулка" может вращаться вокруг своей оси на цапфе, которая представляет собой модуль Б312. Таким образом, соединение цапфы с "втулкой" представляет собой МС4.

Соединение шарошки с роликами и шариками тоже следует рассматривать как совмещение модуля Б311 внутреннего отверстия шарошки и канавки под шарики с наружной цилиндрической поверхностью "втулки" с "буртиком". В итоге получился модуль Б312. Совмещение модуля Б311 шарошки с модулем Б312 "втулки" дает МС4. Поскольку модули Б311 и Б312 являются неполными комплектами баз, то шарошке оставляется возможность вращения вокруг своей оси.

В случае, когда несколько деталей образуют один комплект баз, от модуля соединения на графе 2 наносятся линии к каждой из этих деталей, например, детали 2, 3, 4.

Насадка 5 гидромониторного канала устанавливается в отверстие лапы с помощью цилиндрической наружной поверхности и торца, образующих модуль Б312, ответным ему в лапе будет модуль Б311, образованный отверстием и кольцеобразным торцом. Таким образом, соединение каждой насадки 5, 44, 79 гидромониторных каналов соответственно с лапами 1, 40, 75 осуществляется с помощью МС4. Такие же модули соединения имеют место при монтаже замковых пальцев 6, 45, 80 с лапами соответственно 1, 40, 75.

Таблица 1.4.10

Уровень	Деталь
Б1	1
Б2	8/1(МС4); 9/1(МС4); 2, 3, 4/1(МС4); 5/1(МС4); 6/1(МС4); 10/1(МС4); 11/1(МС4)
Б3	40/1, 8, 9(МС5), 7/2, 3, 4(МС4); 75/1, 10, 11(МС5)
Б4	41, 42, 43/40(МС4); 44/40(МС4); 45/40(МС4); 12/7(МС4); 13/7(МС4); ... 39/7(МС4); 76, 77, 78/75(МС4); 79/75(МС4); 80/75(МС4)
Б5	46/41, 42, 43(МС4); 81/76, 77, 78(МС4)
Б6	47/46(МС4); 48/46(МС4); ... 74/46(МС4), 82/81(МС4); 83/81(МС4); ... 109/81(МС4)

Другая сборочная единица *C2* полностью идентична *C1*, поэтому ее граф будет таким же. Заменяя в графе сборочных единиц и деталей сборочные единицы *C1* и *C2* графами их деталей, получим граф деталей долота (рис. 1.4.28). Его описание приведено в табл. 1.4.10.

Теперь перейдем к построению графа 3 МП, МС долота. Для его построения нужно каждую деталь долота заменить на множество МП. Поскольку в традиционном исполнении чертежей деталей информация о составляющих их МП отсутствует, то на рис. 1.4.29 – 1.4.36 включительно приведены эскизы деталей долота с указанием составляющих их МП и графами. Надо отметить, что у таких деталей, как ролик и шарик, отсутствуют МПБ. Объясняется это тем, что они являются подвижными элементами. В том случае, когда они неподвижны, т.е. когда они не выполняют своих служебных функций, их рабочие поверхности переходят в категорию базирующих поверхностей. Однако, на чертеже указываются МП только исходя из служебного назначения деталей.

На эскизах лап долота не указывались МПС, которые получают на этапе изготовления заготовки и дальнейшей обработке не подвергаются. Рассмотрим состав МП каждой детали долота. Из трех лап долота лапа 1 выполняет роль базовой детали, поэтому ее надо рассматривать отдельно. Но общим для всех лап долота является то, что они непосредственно не участвуют в рабочем процессе, а выполняют роль базовых деталей для монтажа на них других деталей.

Лапа 1 (рис. 1.4.29, а) содержит 4 МПБ, 8 МПР и 8 МПС, всего 20 МП. Из них шесть МП, как следует из графа, служат конструкторскими базами для других МП. После монтажа на лапе четырех штифтов на обеих плоскостях двугранного угла вместо двух модулей Б321 будут образованы два модуля Б322.

Лапы 2 и 3 (см. рис. 1.4.29, а) содержат 3 МПБ, 8 МПР и 8 МПС – итого 19 МП. Из них шесть МП являются конструкторскими базами для других МП. Количество МПБ сократилось за счет того, что лапы 2 и 3 устанавливаются на лапу 1 модулем Б321.

Шарошка (рис. 1.4.30) предназначена для участия в рабочем процессе – дроблении породы, и потому имеет одну степень свободы – вращение на цапфе лапы. На ней устанавливаются твердосплавные зубки путем совмещения модуля Б311 шарошки с модулем Б312 зубка по неподвижной посадке.

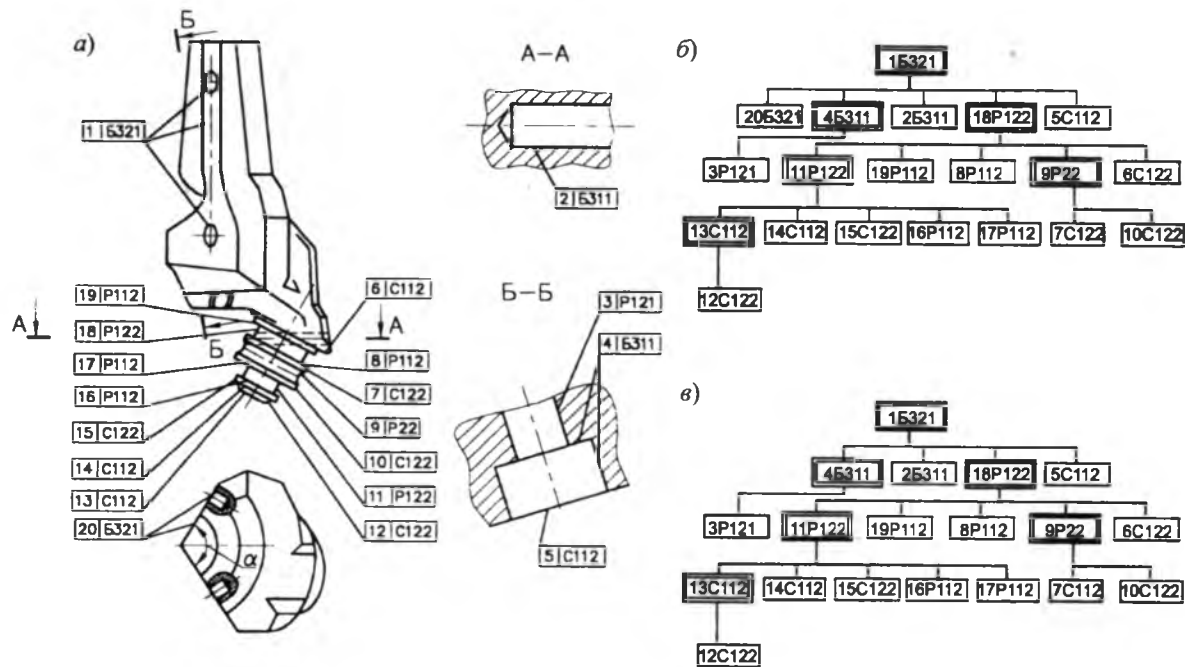


Рис. 1.4.29. Лапа долота:

а – эскиз лапы; б – граф лапы 1; в – граф лап 2, 3

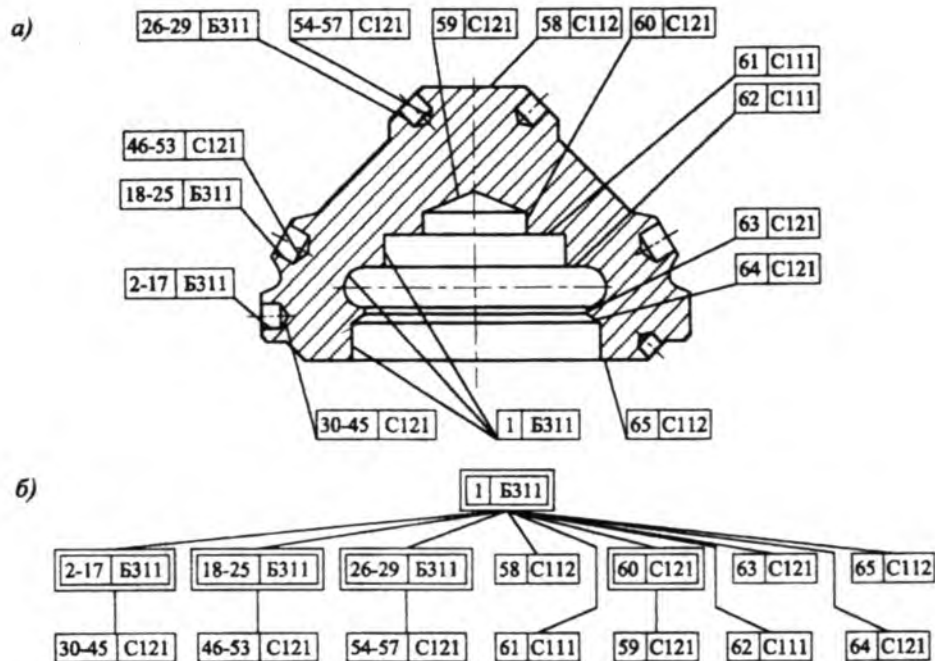


Рис. 1.4.30. Шарошка долота:
а – эскиз шарошки; *б* – граф МП шарошки

Шарошка устанавливается на цапфе лапы через подшипник, образованный двумя наборами цилиндрических роликов и одним набором шариков. В связи с этим шарошка имеет комплект основных баз – модуль Б311, состоящий из двух поверхностей цилиндрического отверстия, и одной сферической поверхности под шарики. Эти поверхности образуют неполный комплект баз, оставляющий шарошке одну степень свободы.

Количество зубков, устанавливаемых на шарошке, равно 28, поэтому под них она содержит 28 модулей Б311, с учетом еще одного Б311, всего МПБ равно 29 и 36 МПС; итого шарошка содержит 65 МП.

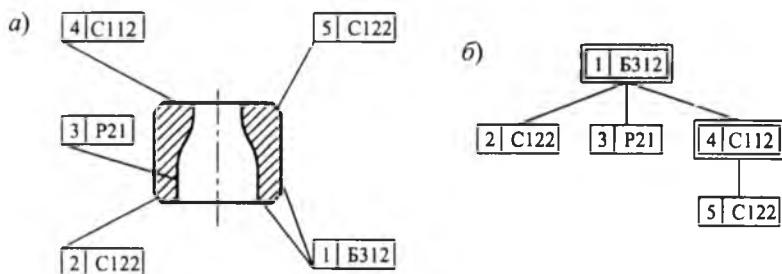


Рис. 1.4.31. Насадка гидромониторного канала:

а – эскиз насадки; б – граф МП насадки

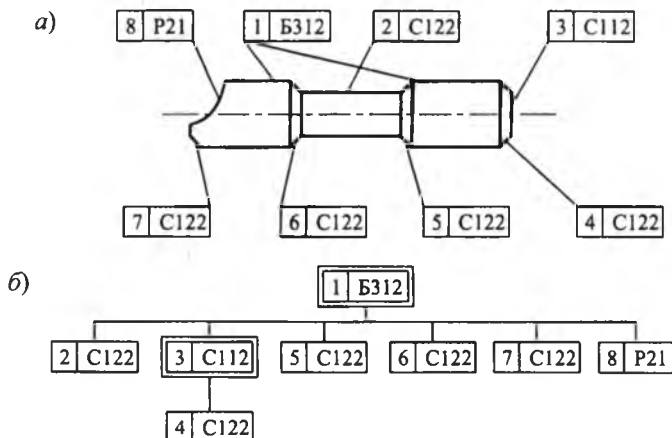


Рис. 1.4.32. Замковый палец долота:

а – эскиз замкового пальца; б – граф МП замкового пальца

Насадка гидромониторного канала (рис. 1.4.31, а) состоит из комплекта основных баз в виде модуля Б311 и рабочей поверхности – модуля Р21, предназначенного для прохождения струи промывочной жидкости и трех МПС. Итого насадка содержит 5 МП.

Замковый палец (рис. 1.4.32, а) содержит модули: Б312, Р21, С112 и пять С122.

Зубок (рис. 1.4.33, а) содержит модули Б312, Р22, Р122 и С122.

Ролик (рис. 1.4.34, а) содержит модули Р122, два С112 и два С122.

Шарик состоит только из одного модуля – Р22.

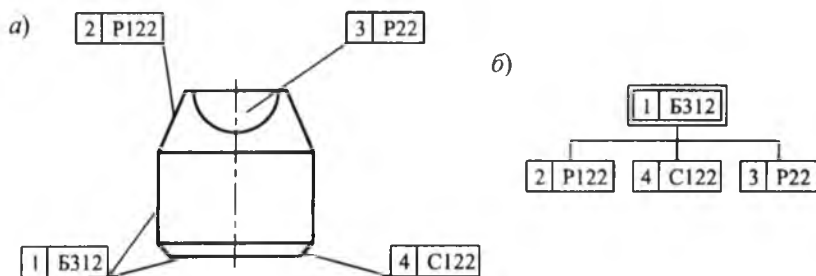


Рис. 1.4.33. Зубок долота:
а – эскиз зубка; б – граф МП зубка

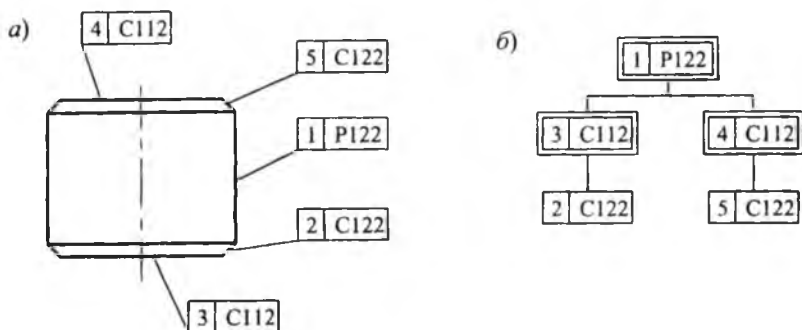


Рис. 1.4.34. Ролик подшипника долота:
а – эскиз ролика; б – граф МП ролика

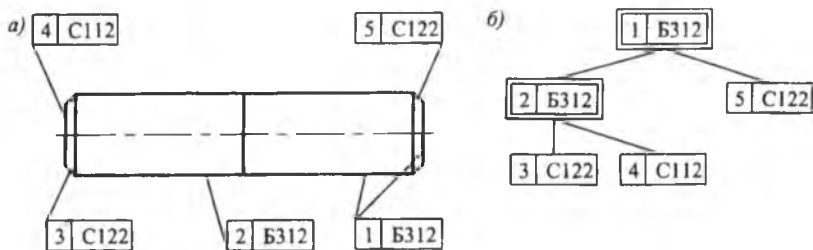


Рис. 1.4.35. Цилиндрический штифт долота:
 а – эскиз цилиндрического штифта; б – граф МП цилиндрического штифта

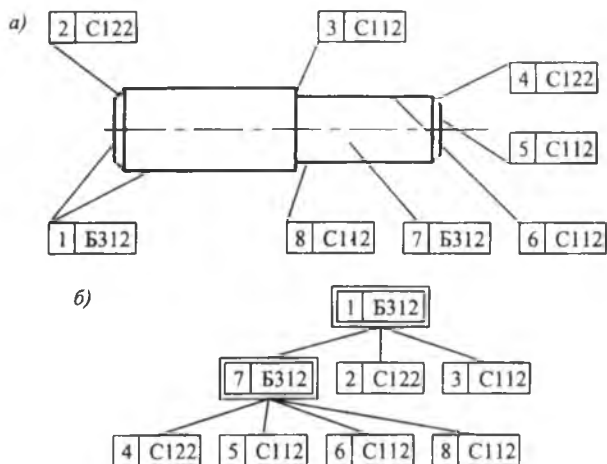


Рис. 1.4.36. Срезанный штифт:
 а – эскиз срезанного штифта; б – граф МП срезанного штифта

Графы МП замкового пальца, зубка и ролика приведены соответственно на рис. 1.4.32, б, 1.4.33, б, 1.4.34, б.

Технологический штифт цилиндрический (рис. 1.4.35, а) содержит модули: два Б312, один С112 и два С122.

Технологический штифт срезанный (рис. 1.4.36, а) содержит модули: два Б312, четыре С112 и два С122. Графы МП цилиндрического и срезанных штифтов приведены на рис. 1.4.35, б и 1.4.36, б.

Заменяв в графе деталей долота (рис. 1.4.28) все детали графами их МП, получим граф МП, МС долота, приведенный на рис. 1.4.37.

В итоге буровое трехшарошечное долото содержит 997 МП (рис. 1.4.38, а), двенадцать наименований из 26 возможных. Количество МС составило 105 штук всего двух наименований из семи (рис. 1.4.38, б).

Для проведения размерного анализа конструкции бурового трехшарошечного долота воспользуемся графами 2 (см. рис. 1.4.28) и 3 (см. рис. 1.4.37).

Долото имеет рабочие поверхности – поверхности зубчатых венцов шарошек. Основными базами долота является резьбовая поверхность ниппельной части долота.

К основным параметрам бурового трехшарошечного долота, которые ограничены допусками, относятся диаметр долота, разновысотность зубков шарошек, радиальное биение диаметрального размера долота относительно резьбы ниппельной части долота и радиальные биения шарошек относительно цапфы лапы.

Выполнение перечисленных выходных параметров долота в заданных пределах обусловлено точностью изготовления составляющих звеньев, образующих конструкторские размерные цепи.

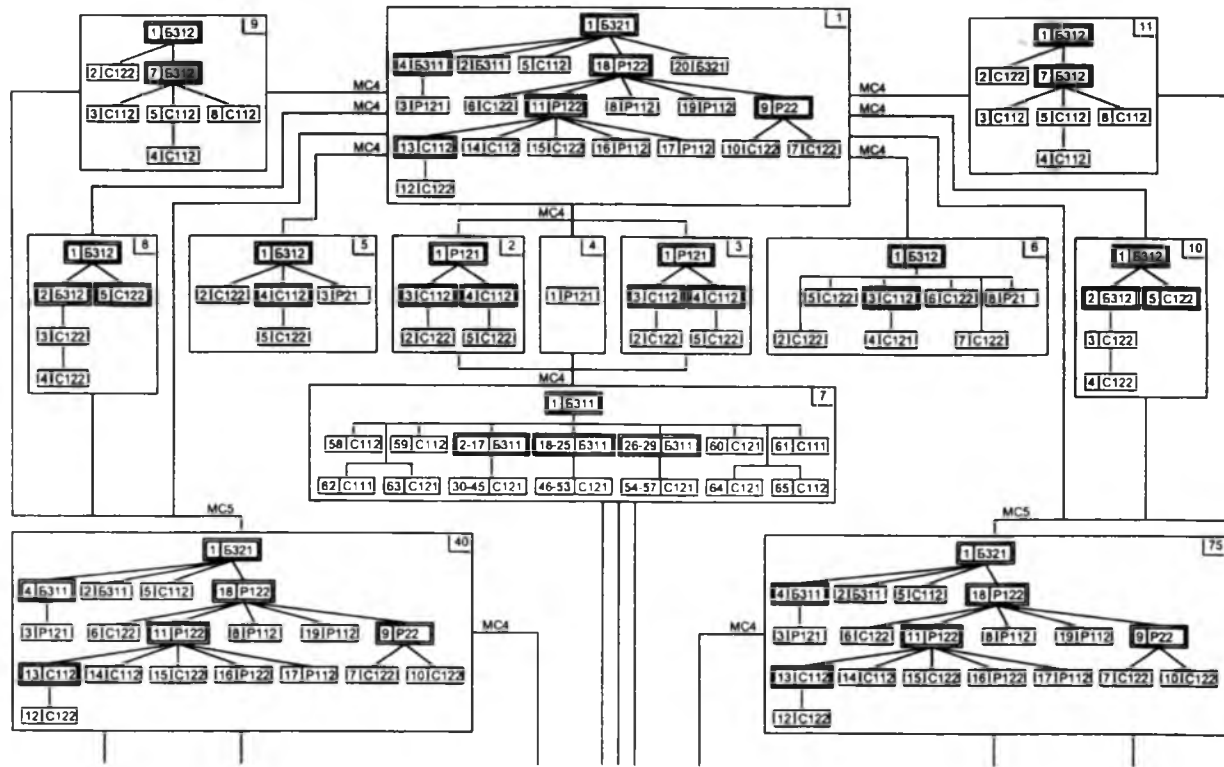
В задачу размерного анализа конструкции долота входит выявление конструкторских размерных цепей выходных параметров долота, проверка обеспечения их норм точности допускам составляющих звеньев и определении методов достижения норм точности, заложенных в конструкции долота.

С помощью графов 2 (см. рис. 1.4.28) и 3 (см. рис. 1.4.37) построим размерные цепи, замыкающимися звеньями которых являются диаметр долота (A_{Δ}), разновысотность (B_{Δ}) зубков шарошек и величины смещений (радиальные биения) (B_{Δ}) образующих конуса каждой шарошки относительно их цапф (см. рис. 1.4.25, а).

Под диаметральной размерной цепью долота понимается диаметр условной окружности бурового трехшарошечного долота, проведенной через наиболее удаленные калибрующие зубья трех шарошек относительно оси резьбовой поверхности ниппельной части долота. Эти зубки лежат на радиусах, расположенных под углом 120° . Итак,

$A_{\Delta} (A_{\Delta}^I, A_{\Delta}^{II}, A_{\Delta}^{III})$ – размер диаметра долота;

B_{Δ} – разновысотность долота, выраженная как расстояние между крайними точками вершин конусов шарошек секций I и II (B_{Δ}^I) и секций I и III (B_{Δ}^{II});



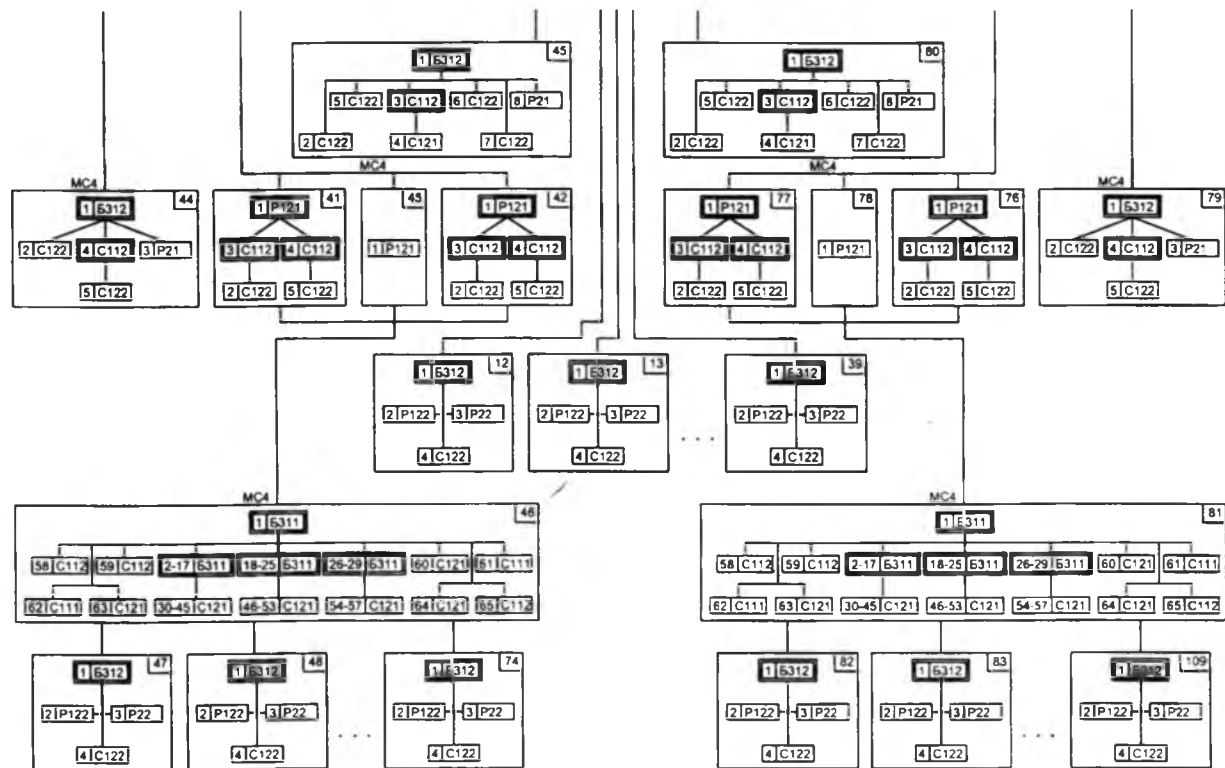


Рис. 1.4.37. Граф 3 МП, МС бурового трехшарошечного долота

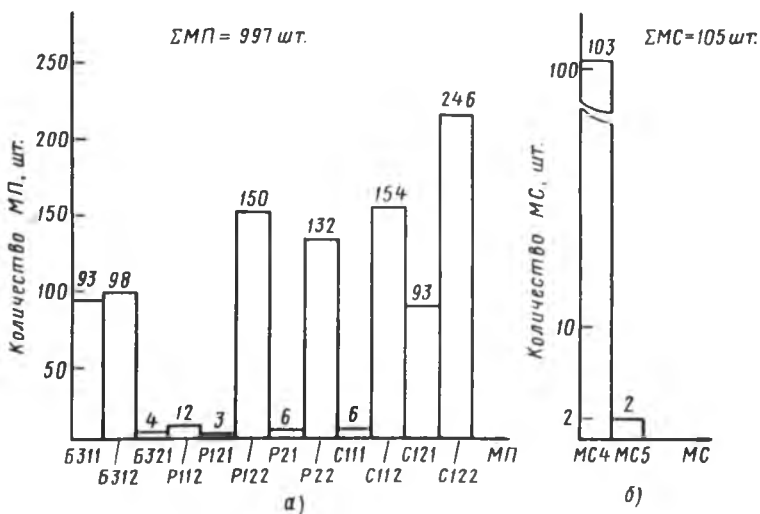


Рис. 1.4.38. Гистограммы:
а – МП долота; б – МС долота

B_{Δ} – величина наибольшего смещения образующей конуса шарошки относительно оси цапфы лапы долота (поскольку у долота три шарошки, то и замыкающих звеньев тоже будет три – B^I, B^{II}, B^{III}) (см. рис. 1.4.39, а).

Сложность построения размерных цепей заключается в том, что ось резьбы ниппеля образуется после сборки долота. Поэтому строить размерные цепи A, B и B надо от базовой детали, в качестве которой выступает лапа I секции I .

Соединив калибрующие зубки трех шарошек, через которые проведена окружность, с осью резьбы ниппеля, получим три отрезка ($A_{\Delta}^I, A_{\Delta}^{II}, A_{\Delta}^{III}$); примем их за замыкающие звенья трех размерных цепей, образующих величину диаметрального размера окружности долота.

Поскольку все размерные цепи, обозначенные одной буквой ($A^I, A^{II}, A^{III}; B^I, B^{II}; B^I, B^{II}, B^{III}$), идентичны, то ведем построение только по одной из них. Итак, размерные цепи A, B и B строятся от лапы I , и конкретно от модуля Б321. Сначала с помощью графа 2 выявим детали, участвующие в размерных цепях A, B и B ; начнем с замыкающих звеньев (1.4.39):

A_{Δ} – это расстояние между деталями 40 и 74,

B_{Δ} – это расстояние между деталями 12 и 74,

B_{Δ} – это расстояние между деталями 12 и I .

С помощью графа 2 можно сравнительно просто установить детали, участвующие своими размерами в размерных цепях A , B , B .

С этой целью сначала нанесем на графе 2 (см. рис. 1.4.39, a) замыкающие звенья A_Δ , B_Δ , B_Δ в виде отрезков, соединяющих соответствующие детали. Далее построим контур каждой размерной цепи из размеров, охватывающих детали, участвующие в размерных цепях. Здесь надо отметить одно важное обстоятельство: в тех случаях, когда МП, являющийся комплектом основных или вспомогательных баз, образован поверхностями, принадлежащими разным деталям, эти детали должны быть объединены в один комплект (K). Тогда контур размерной цепи будет включать расстояния между деталями и сборочными единицами.

Из рис. 1.4.39, a с контурами размерных цепей A , B , B видно, что *размерная цепь A* содержит следующие звенья:

- A_Δ – расстояние между деталями 40 и 74,
- A_1 – расстояние между деталями 74 и 46,
- A_2 – расстояние между деталью 46 и комплектом $K3$,
- A_3 – расстояние между комплектом $K3$ и деталью 40.

В размерную цепь B входят:

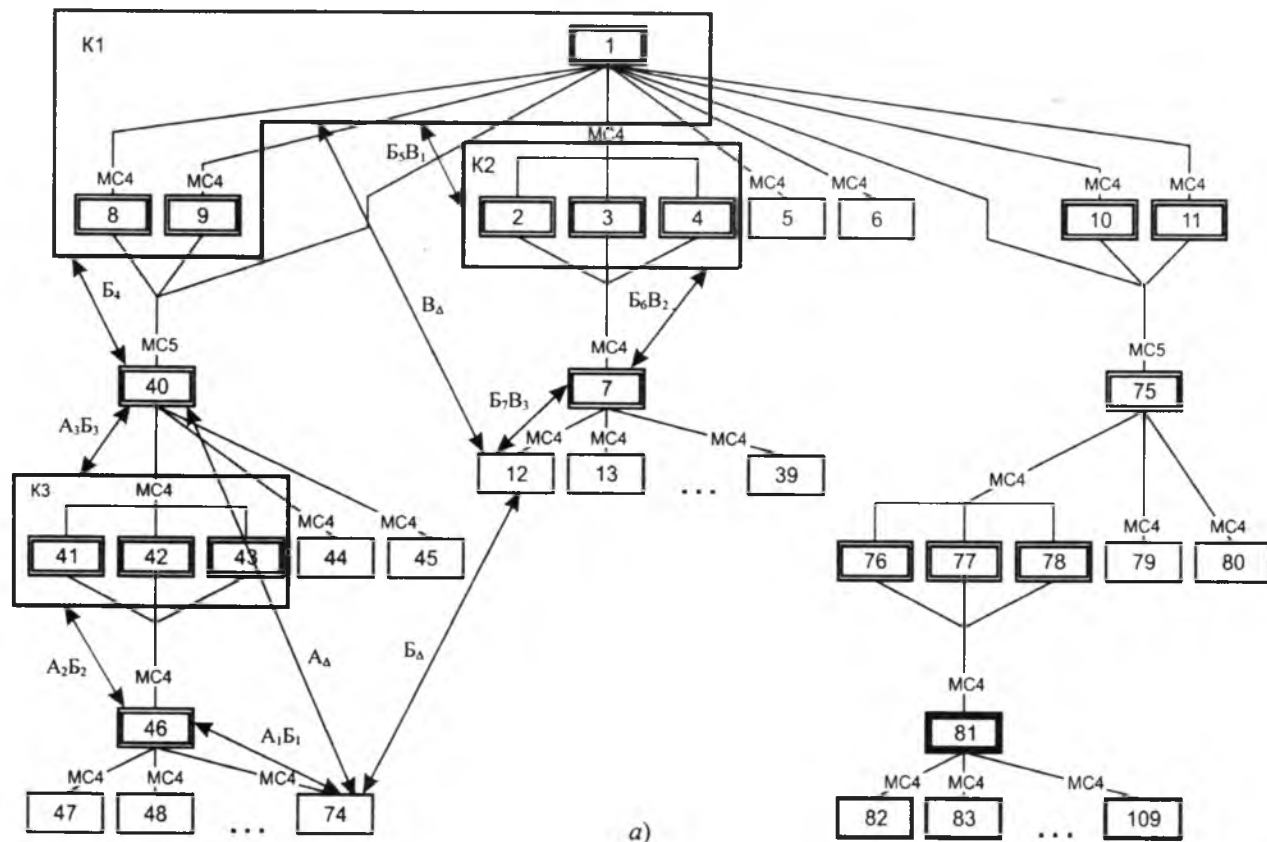
- B_Δ – расстояние между деталями 12 и 74,
- B_1 – расстояние между деталями 74 и 46,
- B_2 – расстояние между деталью 46 и комплектом $K3$,
- B_3 – расстояние между комплектом $K3$ и деталью 40,
- B_4 – расстояние между деталью 40 и комплектом $K1$,
- B_5 – расстояние между комплектами $K1$ и $K2$,
- B_6 – расстояние между комплектом $K2$ и деталью 7,
- B_7 – расстояние между деталями 7 и 12.

В размерную цепь B входят:

- B_Δ – расстояние между деталями 12 и $K1$,
- B_1 – расстояние между комплектом $K1$ и комплектом $K2$,
- B_2 – расстояние между комплектом $K2$ и деталью 7,
- B_3 – расстояние между деталями 7 и 12.

Следующим этапом в построении размерных цепей является установление размеров этих деталей, являющихся составляющими звеньями. Задача решается с помощью графа 3.

На графе 3 (см. рис. 1.4.37) можно видеть МПБ, которыми детали, охваченные размерной цепью, базируются в долоте. У таких деталей звено размерной цепи будет расстояние между МПБ, выступающим в роли комплекта основных баз, и МПБ – комплекта вспомогательных баз, по которому базируется другая деталь, вошедшая в состав размерной цепи.



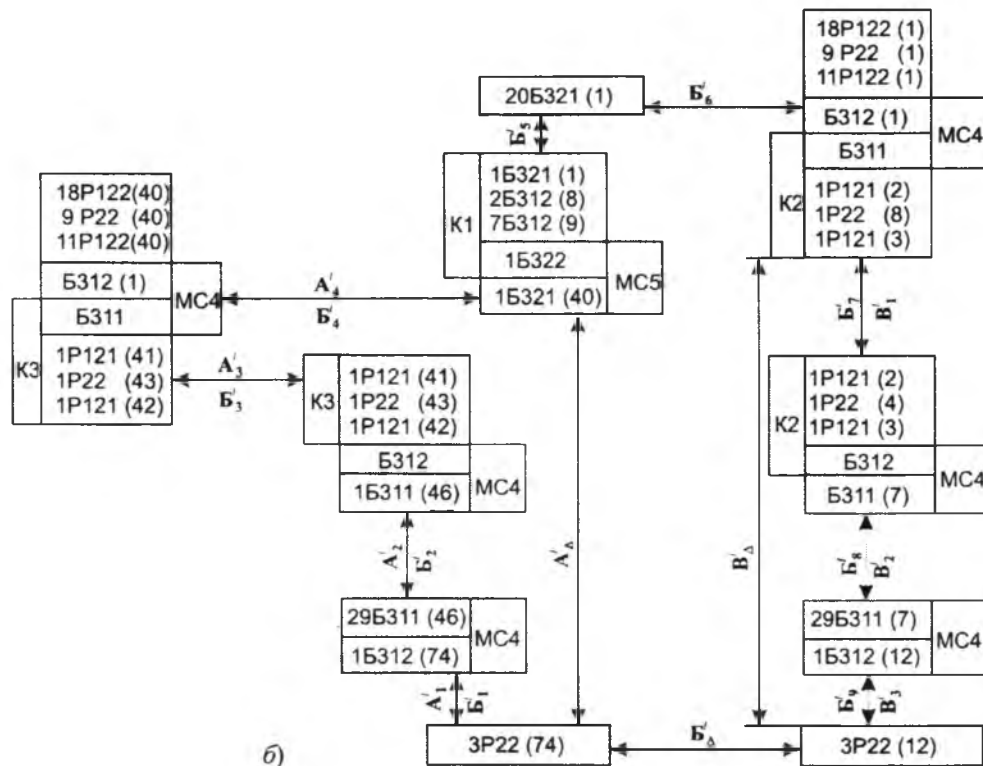


Рис. 1.4.39. Размерные цепи бурового трехшарошечного долота:

а – контуры размерных цепей А, Б, В на графе 2; б – контур размерных цепей А, Б, В на фрагментах графа 3

В общем случае МП является пространственной фигурой, поэтому расстояние между МП описывается тремя линейными x , y , z и тремя угловыми φ , ψ , θ размерами. Отсюда символ звена любой размерной цепи в общем случае отражает функцию шести аргументов, т.е.

$$A_i = f(x, y, z, \varphi, \psi, \theta).$$

В соответствии с изложенным, с помощью графов 2 и 3 найдем звенья размерных цепей A , B , C как расстояния между соответствующими МП деталей. Как уже отмечалось, с помощью графа 2 установлены детали, чьи размеры являются звеньями размерной цепи, а с помощью графа 3 устанавливаются МП этих деталей, ограничивающие звенья размерной цепи.

Запишем звенья размерных цепей как расстояния между соответствующими МП, как показано на рис. 1.4.39, б.

Размерная цепь A . Как следует из графа 2 (см. рис. 1.4.39, а) замыкающее звено A_4 представляет собой расстояние между деталями 74 (наиболее выступающий зубок) и 40 (лапа). При этом у детали 74 крайним МП является модуль 3Р22, а у лапы 40 модулем, определяющим ее положение на базовой лапе 1 долота, является модуль 1Б321 (см. рис. 1.4.37). Тогда A_4 запишется как расстояние между модулями 3Р22 (74) и 1Б321 (40).

Звеном A_1 является расстояние между модулями 3Р22 и 1Б312 зубка 74, где модуль 1Б312 – комплект основных баз.

Звеном A_2 является расстояние между деталями 46 (шарошка) и 74. Эти детали соединяются путем совмещения модуля 1Б312 зубка 74 с модулем 29Б311 шарошки 46, образуя МС4. Тогда звеном A_2 будет расстояние между модулями 29Б311 и 1Б311 шарошки 46.

Звеном A_3 является расстояние между шарошкой 46 и комплектом К3 деталей 41, 42, 43, образующих модуль Б312 (комплект вспомогательных баз) и модуль Б311, выступающий в роли комплекта основных баз, которым комплект деталей базируется на лапе 40.

Шарошка 46 монтируется на комплекте К3 путем совмещения модулей 1Б311 с Б312, образующих МС4. Тогда звеном A_3 будет расстояние между модулями Б312 и Б311 комплекта К3.

Звеном A_4 является расстояние между комплектом К3 и лапой 40. Комплект К3 монтируется на лапе 40 путем совмещения его модуля Б311 с набором модулей (18Р122, 9Р22, 11Р122) цапфы лапы, образующих модуль Б312. Тогда A_4 – это расстояние между Б312 и Б321 лапы 40.

В итоге можно записать:

A'_Δ – расстояние между модулями 3Р22 зубка 74 и 1Б321 лапы 40;

A'_1 – расстояние между модулями 3Р22 и 1Б312 зубка 74;

A'_2 – расстояние между модулями 29Б311 и 1Б311 шарошки 46, где с помощью 1Б311 шарошка базируется на комплекте К3, а с помощью 29Б311 зубок 74 базируется в шарошке;

A'_3 – расстояние между модулями Б312 и Б311, принадлежащими К3;

A'_4 – расстояние между модулями цапфы лапы 40, образующими модуль Б312, по которому базируется К3, и модулем 1Б321 лапы 40.

Сопоставление контура размерной цепи А на графе 2 (см. рис. 1.4.39, а) с размерной цепью А (см. рис. 1.4.39, б) показывает, что во втором случае размерная цепь содержит на одно составляющее звено больше. Это объясняется тем, что на графе 2 составляющими звеньями размерной цепи были расстояния между четырьмя деталями. Поэтому число звеньев будет меньше на единицу числа деталей, а на графе 3 звеньями размерной цепи являются размеры деталей, и потому число звеньев равняется числу деталей.

Аналогично строятся размерные цепи В и В.

Размерная цепь В:

B'_Δ – расстояние между модулями 3Р22 зубка 74 и 3Р22 зубка 12;

B'_1 – расстояние между модулями 3Р22 и 1Б312 зубка 74;

B'_2 – расстояние между модулями 1Б311 и 29 Б311 шарошки 46;

B'_3 – расстояние между модулями Б312 и Б311, принадлежащими К3;

B'_4 – расстояние между модулем Б312, образованного группой модулей 18Р122, 9Р22, 11Р122 и модулем 1Б321, принадлежащих лапе 40;

B'_5 – расстояние между модулями 1Б321 и 20Б321 лапы 1;

B'_6 – расстояние между модулем 1Б321 и модулем Б312 (18Р122, 9Р22, 11Р122) лапы 1;

B'_7 – расстояние между модулями Б311 и Б312 комплекта К2;

B'_8 – расстояние между модулями 1Б311 (комплект основных баз) и 29Б311 шарошки 7;

B'_9 – расстояние между модулями 1Б312 и 3Р22 зубка 12.

В данной размерной цепи число составляющих звеньев больше, чем деталей, вошедших в ее контур, на две единицы. Это объясняется тем, что размерная цепь состоит из двух ветвей, замыкающихся на базовой детали лапы 1, по двум разным комплектам баз 1Б321 и 20Б321. Поэтому

лапа / содержит два составляющих звена, из которых одно – расстояние между этими модулями, а другое – расстояние между цапфой и комплектом основных баз.

Размерная цепь В:

B'_Δ – расстояние между модулями 3Р22 зубка /2 и Б312 (18Р122, 9Р22, 11Р122) лапы /;

B'_1 – расстояние между Б311 и Б312 комплекта К2;

B'_2 – расстояние между модулями 1Б311 и 29Б311 шарошки 7;

B'_3 – расстояние между модулями 1Б312 и 3Р22 зубка /2.

Как следует из рис. 1.4.39, а и б, размерные цепи оказались параллельно связанными и имеют общие звенья. Зная величины допусков на замыкающие звенья, можно рассчитать величины допусков. В табл. 1.4.11 приведены основные характеристики размерных цепей.

Итак, модульное представление долота с помощью графов и соответствующих таблиц дает информацию о сборочных единицах, деталях, входящих в состав долота и его сборочных единиц, о конструкторских базах, номенклатуре и количестве МП и МС, структуре конструкций долота (количестве уровней и ветвей, иерархий сборочных единиц и деталей, деталей, выступающих в качестве баз), размерных цепях, их взаимосвязях, уровне точности, методах достижения точности, заложенных конструктором, и др.

Наименование МП показывает его конструкцию, состав поверхностей, их размеры, требования к геометрической точности и качеству поверхностного слоя.

По наименованию МС с учетом МПБ, образующих МС, устанавливается характер посадки соединения.

Вся эта информация о долоте при наличии технологического обеспечения на модульном уровне позволяет технологу оценить возможность изготовления долота в конкретных производственных условиях, потребности в средствах технологического оснащения и ожидаемую трудоемкость.

Таблица 1.4.11

Размерная цепь	Δ , мм	T_Δ , мм	m	$T_{ср}$, мм	Общие звенья
A'	108,2	0,78	4	0,195	$A'_1B'_1, A'_2B'_2, A'_3B'_3, A'_4B'_4$
B'	0	0,9	9	0,1	$B'_7B'_1, B'_8B'_2, B'_9B'_3,$
B'	0	0,4	3	0,13	

Примечания: Δ – номинальный размер замыкающего звена; T_Δ – величина допуска на замыкающее звено; m – число составляющих звеньев; $T_{ср}$ – средняя величина допуска на составляющее звено.

1.4.7. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЯ

При создании изделия стремятся не только достигнуть высокого технического уровня, но и максимально возможно снизить затраты труда, материалов и энергии на его проектирование, производство, эксплуатацию и утилизацию. Все это характеризует изделие как объект производства.

Конструкция изделия в первую очередь определяется его служебным назначением. Однако, конструктивное исполнение изделия может быть разным, при этом будут разными и затраты ресурсов. Эта разница и является результатом разного уровня технологичности изделия.

Технологичность – это совокупность свойств изделия, определяющих приспособленность его конструкции к достижению оптимальных затрат ресурсов при его производстве, ремонте и утилизации.

Следует подчеркнуть, что технологичность конструкции изделия отражает не функциональные свойства изделия, а свойства его как объекта производства и эксплуатации.

Изделие можно считать технологичным, если оно не только соответствует современному уровню техники, экономично и удобно в эксплуатации, но в нем учтены и возможности применения наиболее экономичных, производительных процессов изготовления, ремонта и утилизации. Из этого следует, что технологичность – понятие комплексное.

С другой стороны, технологичность – понятие относительное, так как при разной программе выпуска изделия технологии изготовления и ремонта существенно различаются.

Процессы изготовления, ремонта и утилизации предъявляют свои требования к конструкции изделия, которые могут противоречить друг другу.

Рассмотрим в качестве примера деталь. Жизненный цикл детали связан с такими процессами, как получение заготовки, обработка заготовки, эксплуатация детали, ее ремонт и утилизация. В зависимости от физической сущности перечисленных процессов каждый из них предъявляет свои требования к материалу детали. Если, например, заготовку получают методом холодной штамповки, ее материал должен обладать свойствами пластичности. Для механической обработки заготовки надо, чтобы материал обладал свойствами обрабатываемости. Процесс эксплуатации детали требует от материала, например, высокой прочности и износостойкости, а ремонт – способности восстанавливать свои свойства.

Если эти требования оказываются противоречивыми, конструктор прежде всего должен стремиться обеспечить эксплуатационные требова-

ния, затем определить те методы получения заготовки, ее обработки и ремонта детали, которые позволяют свести к минимуму эти противоречия. Если и этими мероприятиями не удастся устранить противоречия, то конструктору там, где это допустимо, следует пересмотреть требования к материалу с точки зрения процесса эксплуатации детали. Дело в том, что эффективность изделия оценивается не только эффективностью процесса эксплуатации, но существенно зависит и от процессов изготовления и ремонта. Учитывая это, следует принимать в расчет суммарный экономический эффект. Поэтому когда спроектированное изделие оказывается настолько нетехнологичным, что или не может быть изготовлено, или его изготовление оказывается очень дорогим, что сводит на нет экономический эффект от эксплуатации изделия, приходится идти на снижение эксплуатационных показателей. Это приведет к снижению эффективности использования изделия в процессе эксплуатации, но при этом суммарный эффект окажется выше.

Технологичность изделия оценивается с помощью показателей рациональности, преемственности, ресурсоемкости.

Рациональность конструкции изделия характеризуется сложностью, сборностью, легкостью элементов конструкции, доступностью, распределением допусков между изготовлением и сборкой и др.

Преемственность конструкции изделия включает конструктивную и технологическую преемственность, изменяемость и повторяемость материалов элементов, компоновок конструкции и процессов изготовления, ремонта и др.

Ресурсоемкость конструкции изделия отражает воплощенные в конструкции затраты таких ресурсов, как трудоемкость, материалоемкость, энергоемкость.

Все эти показатели характеризуют технологичность изделия в его производстве, эксплуатации, ремонте и утилизации.

Характерным для технологичности изделия является то, что она не оценивается абсолютными показателями, а познается в сравнении.

Совершенствование конструкции в направлении снижения затрат ресурсов называется отработкой конструкции на технологичность.

К конструктивным особенностям изделия, положительно влияющим на его технологичность, относятся:

- 1) минимальное количество звеньев в кинематических и размерных цепях (чем меньше звеньев, тем легче обеспечить заданную точность относительного движения и положения исполнительных поверхностей изделия);

- 2) отсутствие параллельно связанных размерных цепей, усложняющих процесс достижения точности замыкающих звеньев;
- 3) применение методов полной взаимозаменяемости и регулировки достижения точности замыкающих звеньев;
- 4) наличие полных комплектов баз у деталей;
- 5) наличие в изделии унифицированных деталей и сборочных единиц;
- 6) наличие у деталей конструктивных форм, обеспечивающих свободный доступ к обрабатываемым поверхностям, применение высокопроизводительных методов обработки;
- 7) наличие материалов, отличающихся хорошей обрабатываемостью, и др.

1.4.8. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ

Изготовление изделия связано с затратами труда, материалов, энергии и времени. Поэтому изделие должно не только отвечать требованиям служебного назначения, но и отличаться от ранее выпущенных изделий аналогичного назначения меньшими затратами (изложенное подчеркивает органичную связь технологии и экономики). Технолог должен разрабатывать такие технологические процессы, которые были бы наилучшими не только в техническом, но и экономическом отношении.

К технико-экономическим показателям производства изделия относятся себестоимость, трудоемкость и другие показатели.

Себестоимость изделия выражается в денежной форме и отражает затраты на его изготовление обоих видов труда: живого и прошлого, и тем самым характеризует организационно-технический уровень производства и состояние хозяйственной деятельности предприятия. Различают себестоимость полную и производственную, в которую входит технологическая.

Производственная себестоимость отражает затраты на израсходованные средства производства и заработную плату на изготовление изделия на предприятии, выраженные в денежной форме.

Технологическая себестоимость отражает только те затраты, величина которых переменна для различных вариантов технологических процессов. К таким затратам относятся прежде всего расходы на заработную плату, амортизацию, эксплуатацию и ремонт оборудования, инструмента и приспособлений.

В *полную себестоимость* включаются производственная себестоимость и внепроизводственные расходы, связанные с упаковкой, транспортированием и реализацией продукции, отчислениями в фонды освоения новой техники и научно-исследовательской работы, и другие виды расходов.

В результате непрерывного развития и совершенствования техники, повышения ее производительности доля живого труда уменьшается, а доля прошлого труда растет (через амортизационные расходы). Поэтому задача повышения производительности общественно полезного труда заключается в уменьшении суммы обоих видов труда, затрачиваемого в единицу времени. Отсюда одной из основных задач технологии машиностроения является непрерывное снижение себестоимости выпускаемой продукции.

Расчет себестоимости получил название калькуляции. Различают плановую и фактическую себестоимость и соответственно сметную и отчетную калькуляции. Расчет плановой себестоимости позволяет выбрать на этапе проектирования технологического процесса наиболее экономичный вариант, а фактическая себестоимость служит для установления фактических затрат на изготовление изделия. Рассчитывают себестоимость изделия, его сборочных единиц, деталей и отдельных операций.

При составлении калькуляции затраты условно делят на прямые и косвенные. *Прямые затраты* – это те, на величину которых может влиять разработчик технологических процессов. К ним относятся затраты на материалы, из которых изготавливают изделие, вспомогательные материалы (смазочные, обтирочные, инструменты, приспособления и др.), топливо, электроэнергию, пар, затрачиваемые непосредственно на изготовление изделия, основная заработная плата.

Косвенные затраты – это те, которые не могут быть отнесены непосредственно на себестоимость данного изделия и поэтому включаются в нее в виде отчислений. К косвенным затратам относятся расходы, относящиеся к обслуживанию производства, эксплуатации и содержанию оборудования, отчисления на социальное страхование, расходы на содержание заводоуправления, складов и др. Имеются два принципиально отличных метода расчета себестоимости изделия. По первому методу себестоимость

$$C = \sum_{i=1}^p M + \sum_{i=1}^m \left(1 + \frac{a_1 + a_2}{100} \right) z, \quad (1.4.1)$$

где M – расходы на материалы, на единицу продукции за вычетом стоимости отходов, руб.; a_1 – отчисления с заработной платы на социальные расходы, %; a_2 – накладные расходы, начисляемые на заработную плату, %; Z – заработная плата производственных рабочих, руб.; p – число различных марок материалов, расходуемых на единицу продукции; m – число операций изготовления единицы продукции.

Преимущество этого метода заключается в простоте расчета, а недостаток – в обезличивании влияния различных факторов на себестоимость.

Если необходимо оценить влияние расходов на оборудование, инструмент, приспособления, себестоимость определяют так:

$$C = \sum M + \sum \left[O + P + И + \left(1 + \frac{a_1 + a_3}{100} \right) \right] Z, \quad (1.4.2)$$

где O – расходы на амортизацию и содержание оборудования, приходящиеся на единицу продукции, руб.; P – расходы на амортизацию и содержание приспособлений и другой технологической оснастки, приходящиеся на единицу продукции, руб.; $И$ – расходы на амортизацию и содержание инструмента, приходящиеся на единицу продукции, руб.; a_3 – накладные расходы, начисляемые на заработную плату, % (при их определении не включают расходы на амортизацию и содержание оборудования, приспособлений и инструмента).

Расчет себестоимости по второму методу позволяет также правильно выбрать пути ее сокращения.

Не менее важным технико-экономическим показателем является трудоемкость изделия.

Трудоемкость отражает затраты только живого труда, что находит свое отражение в качестве одного из слагаемых себестоимости. На основе трудоемкости рассчитывается потребное количество рабочих для осуществления технологического процесса по изготовлению данного изделия. Трудоемкость изделия складывается из трудоемкости его сборочных единиц; трудоемкость сборочных единиц равна сумме трудоемкостей деталей и сборочных операций; трудоемкость детали равна сумме трудоемкостей операций по ее изготовлению; трудоемкость операции складывается из трудоемкости переходов.

К другим технико-экономическим показателям изделия относятся производственная мощность, выработка рабочих, материалоемкость, энергоемкость, инструментоемкость, а также показатели, выраженные в

таких величинах, как выпуск продукции (в штуках или денежном выражении), приходящийся на один участок, на одного производственного рабочего, на 1 м² площади, на единицу оборудования (в кВт · ч на штуку, в станко-час на штуку и др.).

Эти показатели выражают затраты некоторых элементов общественного труда, а также их экономию или перерасход и тем самым способствуют разработке наилучшего варианта технологического процесса.

В оценке технико-экономических показателей изготовления изделия большую помощь оказывает анализ цикла ее изготовления. Например, цикл изготовления детали складывается из затрат времени на операции и пролеживания заготовки между ними (рис. 1.4.40). Небезразлично, как сокращать цикл изготовления изделия. Более выгодно его сокращать в результате исключения последних операций, так как сумма вкладываемых в них средств наибольшая (рис. 1.4.41). Это объясняется использованием на финишных операциях более дорогого оборудования, рабочих высокой квалификации, увеличением продолжительности операций, обеспечивающих окончательное качество изделия.

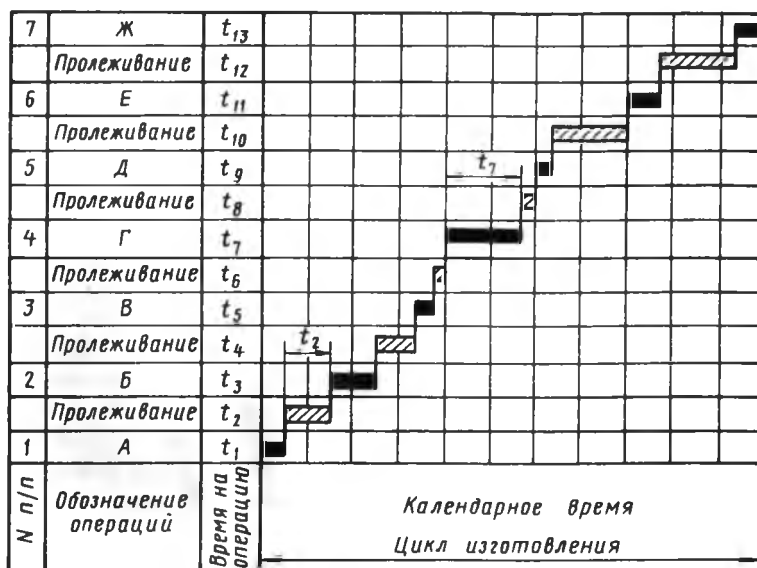


Рис. 1.4.40. Циклограмма изготовления детали

Итак, постановка задачи по производству изделий заключается в выпуске изделий, отвечающих своему служебному назначению в требуемом количестве в заданный промежуток времени и с наименьшими затратами общественно полезного труда.

Прежде чем перейти к изложению путей решения этой задачи, необходимо изучить закономерности технологического процесса, понимание которых служит основой ее правильного решения.

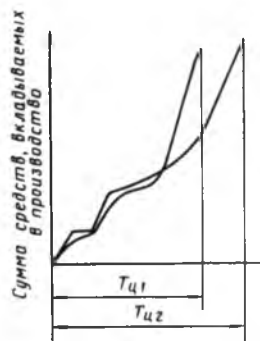


Рис. 1.4.41. Зависимость цикла изготовления от суммы вкладываемых средств

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На какие виды делятся поверхности деталей?
2. Что такое модуль поверхностей?
3. На какие классы делятся МП?
4. Чем характеризуется МП?
5. В чем разница между внешними и внутренними размерными связями МП?
6. Что такое граф размерных связей МП деталей?
7. Как строится граф МП детали?
8. Что показывает граф МП детали?
9. Что такое модуль соединения?
10. Приведите примеры МС.
11. Как строится гистограмма МП?
12. Каково соотношение базирующих, рабочих и связующих МП у различных изделий?
13. Последовательность построения графа МП и МС изделия.
14. Как в табличной форме записывается информация с графа МП детали?
15. Как в табличной форме записывается информация с графа МП, МС изделия?
16. Построить размерную цепь с помощью графа МП, МС изделия.
17. Что такое технологичность изделия?
18. Какими показателями оценивается технологичность изделия?
19. В чем разница между производственной, технологической и полной себестоимостью?
20. В чем разница между прямыми и косвенными затратами?
21. Чем отличается трудоемкость от себестоимости?

Глава 1.5

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1.5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Технологические процессы механосборочного производства подразделяют на заготовительные процессы для получения заготовок, процессы обработки заготовок для получения деталей и сборочные процессы.

В результате технологического процесса происходит изменение свойств предмета труда: изменяются физические, химические, механические свойства материалов, размеры и форма предмета труда, качество его поверхностного слоя, внешний вид и др. Таким образом, в основе любого технологического процесса лежит соответствующий метод воздействия на предмет труда.

Основу технологических процессов изготовления деталей составляют формообразующие методы, методы изменения физико-механических свойств материала, методы воздействия на качество поверхностного слоя (методы покрытия, отделки, окраски и др.).

Формообразующие методы делятся на методы со съемом материала и без съема материала. Первые подразделяются на методы резания материала (точение, строгание, сверление, зенкерование, развертывание, фрезерование, протягивание и др.), методы абразивной обработки (шлифование, хонингование, супоршлифование, доводка и др.), электрофизические и электрохимические методы.

К методам без съема материала относятся методы пластического деформирования; к методам изменения физико-механических свойств материала относятся различные виды термической обработки, химико-термические процессы.

Основу сборочных технологических процессов составляют методы соединения деталей, которые делятся на методы, образующие разъемные и неразъемные соединения.

К методам, образующим неразъемные соединения, относятся пластическое деформирование, сварка, склеивание, пайка и др.

Технологический процесс может состоять из одной или нескольких операций; последовательность операций технологического процесса принято называть маршрутом. В технологический процесс включаются не только операции, связанные с изменением свойств предмета труда, но и операции контроля и транспортировки. В свою очередь технологическая операция представляет собой совокупность технологических и вспомогательных переходов.

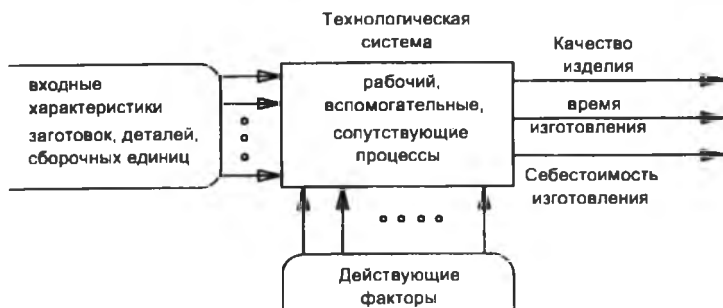


Рис. 1.5.1. Структура технологической операции

Содержание операции может быть представлено с помощью схемы (рис. 1.5.1). Согласно этой схеме, внутри технологической системы происходит качественное изменение предмета труда или изменение его положения под воздействием рабочего процесса, вследствие чего их исходные качественные характеристики преобразовываются в заданные качественные характеристики изделия. Эти преобразования осуществляются в условиях действия вспомогательных, сопутствующих процессов и окружающей среды.

Для качественного преобразования предмета труда необходимы затраты энергии, времени и материальных средств. При этом операцию можно осуществлять при непосредственном участии человека или без него. Рассмотрим содержание элементов технологической операции.

Выходные показатели – это конечный результат операции, который характеризуется качеством полученного изделия, затратами времени на осуществление операции и ее себестоимостью.

Входные данные при изготовлении детали характеризуют качество заготовки, поступающей на операцию; при сборке – это качество деталей и сборочных единиц, поступающих на сборку. Качественные характеристики выражаются в номинальных значениях и допусках на отклонения.

Тип технологической системы определяется технологическим процессом (например, для сборочного процесса – это сборочная машина, для механической обработки деталей – это обрабатывающая система, для операции упаковки – это упаковочная машина и т.д.). Технологическая система характеризуется целым рядом параметров, описывающих ее технологические возможности и качество.

Рабочий процесс – это процесс непосредственного изменения качественного состояния предмета труда (например, при сборке соединения с гарантированным натягом – это процесс запрессовки; при механической обработке заготовки со снятием материала – это процесс резания материала и т.д.). Рабочий процесс характеризуется методом воздействия, инструментом и режимом работы.

Вспомогательные процессы – это процессы, которые необходимы для осуществления рабочего процесса (например, при обработке заготовок на станке – это закрепление заготовки, раскрепление и снятие обработанной детали, подвод и отвод режущего инструмента, охлаждение и т.п.). Вспомогательные процессы тоже характеризуются методом осуществления, режимом работы и существенно влияют на конечные результаты технологического процесса.

Сопутствующие процессы. Во время рабочего и вспомогательных процессов, как правило, имеют место процессы трения, выделения теплоты и нагрева элементов технологической системы, вибрации, химической реакции; все они могут как положительно, так и отрицательно влиять на результаты технологического процесса. Сопутствующие процессы – это объективно действующие процессы независимо от нашего желания, поэтому приходится предпринимать различные меры по уменьшению их вредного влияния.

Действующие факторы. Технологическая система находится под непрерывным воздействием многочисленных факторов, порождаемых рабочими, вспомогательными, сопутствующими процессами и окружающей средой. К ним относятся: силовое воздействие; тепловое воздействие, вызванное выделением теплоты в самой технологической системе, лучами солнца, обогревательными устройствами; вибрации; влияние оператора и др.

Рассмотрим содержание операций технологических процессов по обработке заготовок и сборки изделий.

Технологические процессы обработки заготовок характеризуются выходными показателями, которыми являются геометрические погрешности обработки, отклонения показателей качества поверхностного слоя детали, затраты времени на обработку заготовки и себестоимость обработки.

Рабочие процессы обработки заготовок разнообразны и делятся (как уже отмечалось) на две группы: связанные со снятием материала и без снятия материала.

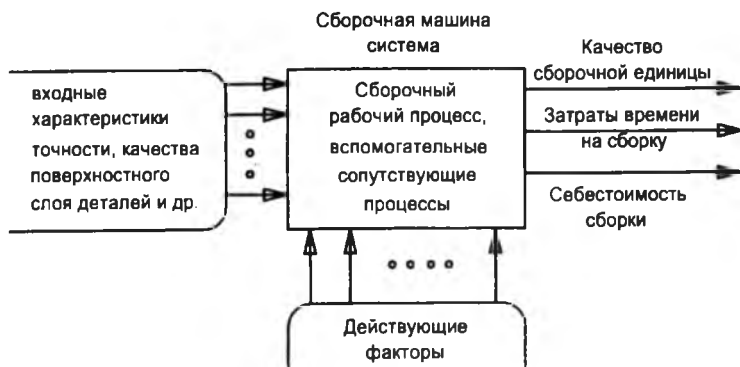


Рис. 1.5.2. Схема технологической операции сборки изделия

Каждый рабочий процесс характеризуется кинематикой относительного движения заготовки и инструмента, параметрами режима обработки и типом инструментов.

К вспомогательным процессам относятся установка и снятие заготовки и инструмента, подвод–отвод инструмента и т.п.

Технологический процесс сборки содержит действия по установке и образованию соединений деталей, сборочных единиц в изделие. При этом учитывается техническая и экономическая целесообразная последовательность получения изделия (рис. 1.5.2).

Качество сборочной единицы характеризуется точностью относительного движения или расположения деталей в сборочной единице, силовым замыканием, натягом в неподвижных соединениях, зазором в подвижных соединениях, качеством прилегания поверхностей и другими.

Под сборочной операцией понимается процесс непосредственного формирования сборочной единицы. Он, как правило, включает ориентацию, соединение, регулировку и закрепление (фиксацию) деталей и сборочных единиц. Сборку соединений условно можно разделить на сборку с натягом и без натяга.

Сборка с натягом осуществляется или методом пластического деформирования, или тепловым методом. В свою очередь тепловой метод реализуется посредством нагрева охватывающей детали или охлаждения охватываемой детали.

К *вспомогательным процессам* относятся:

- подготовительные, в результате которых детали и сборочные единицы приводят в состояние, требуемое условиями сборки (например, протирка, сортировка, укладка в тару и т.п.);
- контрольные, предназначенные для проверки годности детали, сборочной единицы и их соответствия техническим условиям на сборку;
- демонтажные, заключающиеся в частичной разборке сборочной единицы, и некоторые другие процессы.

Технологический процесс осуществляется во времени и пространстве, при этом состояние технологической системы, входные данные, параметры рабочего и других процессов, действующие факторы непрерывно изменяются, оказывая тем самым влияние на выходные показатели технологического процесса. В задачу технолога входит обеспечение всех выходных показателей технологического процесса на заданном уровне. Чтобы решить эту задачу, правильно строить и управлять технологическими процессами, необходимо знать закономерности технологических процессов.

Известно, что при осуществлении технологического процесса изменение режима рабочего процесса приводит к изменению качества изделия. Если требуется получить более высокое качество изделия при прочих равных условиях, то на осуществление технологического процесса планируют большую трудоемкость. Например, если на токарном станке необходимо изготовить два вала: один с точностью до 0,1 мм по диаметру, а другой с точностью до 0,01 мм, то во втором случае обработку будут осуществлять с большим числом технологических переходов и с меньшими параметрами режима обработки на заключительном переходе. В итоге затраты времени на изготовление вала с большей точностью возрастут.

Из изложенного следует, что качество и производительность – это две противоположные стороны технологического процесса; нельзя себе представить процесс без качества или производительности. Противоречие между качеством и производительностью заключается в том, что изменение одной стороны влечет за собой изменение другой стороны в противоположном направлении. Иными словами, с повышением производительности при прочих равных условиях снижается качество изделия. Если необходимо повысить качество изготовления изделия, то приходится снижать производительность процесса.

Непрерывный рост требований к качеству и производительности обостряет противоречия между ними. Разрешение этих противоречий сопровождается качественным скачком в развитии технологического

процесса, и последний приобретает новое качество, выражающееся в создании новых методов воздействия на предмет труда, принципиально нового оборудования. Без преодоления указанных противоречий немислимо дальнейшее развитие технологии машиностроения.

В разрешении противоречия между качеством и производительностью процесса можно отметить три направления: повышение качества при сохранении заданной производительности; повышение производительности при сохранении заданного качества; повышение одновременно качества и производительности процесса.

Технологические процессы условно делятся на проектные и рабочие.

Проектный технологический процесс – это процесс, выполняемый по предварительному проекту технологической документации.

Рабочий технологический процесс – это процесс, выполняемый по рабочей технологической документации.

1.5.2. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Чтобы разрабатывать технологические процессы изготовления изделия, надо знать методы получения заготовок, их обработки, соединения деталей, технологическое оборудование, оснастку. Все это составляет элементную базу технологических процессов. К сожалению, элементная база технологических процессов существует, как правило, в неявном виде и не оформлена в виде единого банка данных, что приводит к большому влиянию субъективного фактора при разработке технологических процессов. В этих условиях уровень качества и затраты времени на разработку технологических процессов во многом зависят от квалификации технолога, т.е. насколько полно он знает существующие методы изготовления изделий, технологическое оборудование и оснастку.

Создание элементной базы наталкивается на трудности, связанные с наличием огромного разнообразия элементов технологического назначения. В процессе развития машиностроения накоплен колоссальный опыт в области технологии изготовления изделий. Разработано огромное множество технологических процессов, методов, способов, приемов изготовления деталей и сборки изделий. Такое разнообразие объясняется как объективными, так и субъективными причинами. К объективным причинам относятся широкая номенклатура изделий, различные масштабы их выпуска, разнообразие производственных условий. К субъективным причинам относится опыт технолога, так как методика разработки технологических процессов несовершенна и отличается низким уровнем формализации.

Отсутствие единой элементной базы технологического обеспечения механосборочного производства приводит к большим потерям как на уровне всего машиностроения, так и на уровне предприятия; на уровне отрасли приводит к неоправданному разнообразию технологического обеспечения, т.е. порождает необоснованно большое разнообразие технологических процессов, оборудования, оснастки.

Отсутствие элементной базы приводит к дублированию разработок, к утере технологического знания. Действительно, приобретенный опыт в значительной степени оказывается утерянным из-за несовершенства методов распространения информации о них.

Так, например, специфика некоторых изделий зачастую требует разработки оригинальной технологии. Разработка и внедрение такой технологии, как правило, связаны с большими трудозатратами, требуют высокой квалификации разработчиков и длительного времени для ее отработки. После прекращения выпуска изделий информация об этой технологии становится зачастую недоступной для других изготовителей подобных изделий, потому что эта технология нигде не была опубликована; если даже была опубликована, то найти ее в огромном потоке информации тоже чрезвычайно сложно. В итоге полезный опыт, приобретенный с большими трудностями и затратами, оказывается утерянным и не может быть использован другими предприятиями.

Отсутствие оформленной элементной базы на уровне предприятия приводит к тому, что качество разработанных технологических процессов в значительной степени зависит от квалификации технолога, степени знания им прогрессивных методов изготовления изделия, существующего технологического оборудования и имеющегося оборудования на предприятии. Таким образом, очевидна актуальность создания элементной базы технологических процессов.

Для технолога важно, чтобы в состав элементной базы в качестве средств технологического оснащения входили не отдельные обрабатывающие и измерительные инструменты, а инструментальные наладки и контрольно-измерительные приспособления.

По мере развития машиностроительного производства стали появляться типовые технологические решения задач, связанных с достижением заданного качества выпускаемых изделий и производительности процессов, типовые операции и типовые технологические процессы. В зависимости от уровня обобщения они должны входить в состав элементной базы предприятия или отрасли.

Широкая компьютеризация в производственной деятельности человека создает благоприятные предпосылки для создания единой элементной базы.

При разработке систем автоматизированного проектирования технологических процессов одной из необходимых задач является создание банка данных технологического назначения. Информация об элементах, входящих в состав технологической базы, должна содержать не только описание сущности методов воздействия и средств технологического оснащения, но и их область применения, качественные и стоимостные характеристики. Это необходимо для того, чтобы технолог при разработке технологических процессов имел возможность для заданных условий выбирать лучшие решения.

Наличие элементной базы технологических процессов позволит широко распространять прогрессивные решения, снизить разнообразие средств технологического обеспечения до необходимого минимума, свести к минимуму дублирование в разработках технологических процессов, оборудования и оснастки.

1.5.3. ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Технологические процессы по уровню обобщения делятся на два вида: единичный и типовой.

Единичный технологический процесс применим только для изготовления одного конкретного изделия, а типовой технологический процесс – для изготовления группы схожих изделий.

Единичный технологический процесс – это процесс изготовления или ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения, независимо от типа производства.

К преимуществам единичного технологического процесса относятся, с одной стороны, возможность учета всех особенностей данного изделия, а с другой стороны, наиболее эффективного изготовления изделия за счет учета конкретных производственных условий (имеющегося технологического оборудования, приспособлений, инструментальной оснастки, квалификации рабочих и т.п.).

Наряду с преимуществами единичный технологический процесс имеет и недостатки. Для его разработки требуются большие затраты времени и труда.

Затраты времени на разработку технологического процесса могут во много раз превышать затраты времени на его осуществление. Если изго-

тавляется большое число изделий, то доля затрат времени на разработку технологического процесса, приходящаяся на одно изделие, будет незначительной, но при небольшом выпуске изделий эта доля резко возрастет. В этом случае разрабатывают укрупненный технологический процесс, например, создают лишь маршрутное описание технологического процесса, в которое включают последовательность операций и оборудование, но без указаний переходов и режимов процесса. Все остальное предоставляется решать непосредственно рабочему, который должен иметь соответствующую квалификацию. По мере роста объема выпускаемой продукции разработку технологического процесса проводят более подробно.

В единичном производстве высокая продолжительность разработки технологического процесса нередко входит в противоречие с продолжительностью самого процесса. Чем тщательней и подробней разрабатывается единичный технологический процесс, тем больше времени требуется для его разработки и тем выше должна быть квалификация технолога. Однако в определенных условиях затраты времени на разработку процесса становятся значительно больше затрат времени на его осуществление. Иллюстрацией такого положения может служить технологический процесс изготовления деталей на станке с ЧПУ, где его разработка отличается большой тщательностью и подробностью. Так, к примеру, документация технологического процесса изготовления детали на станке с ЧПУ содержит карту наладки, операционно-техническую карту, схему движения инструментов, операционную расчетно-техническую карту, карту программирования, чертежи специального инструмента и оснастки. Все это приводит к росту трудоемкости разработки операции; например, только разработка управляющей программы и ее отладка для деталей высокой сложности требует нескольких рабочих дней технолога-программиста, в то время как обработка небольшой партии таких деталей может уложиться в одну рабочую смену.

Проектирование единичного технологического процесса отличается большим числом возможных решений по каждому изделию, подлежащему изготовлению. Поэтому в условиях единичного производства при сравнительно малом времени, отводимом на разработку процесса, возможность подкрепления принимаемых решений объективными технико-экономическими расчетами очень ограничена.

В массовом производстве высокая трудоемкость тщательной разработки единичного технологического процесса оказывается оправданной, так как ее величина несопоставимо мала по сравнению с трудоемкостью

изготовления всего объема изделий данного наименования. Оправдывает себя в массовом производстве и применение специального оборудования, оснастки, отличающиеся высокопроизводительными рабочими процессами.

Недостатки единичной технологии в массовом производстве проявляются в большой длительности технологической подготовки производства, обусловленной необходимостью создания специальных технологических средств.

Широкое применение единичной технологии в масштабе всего машиностроительного производства страны приводит к большим потерям. Дело в том, что в среднем изготавливаемые изделия состоят примерно на 70 % из общемашиностроительных узлов и деталей, близких по своему конструктивному строению. Но на тысячах машиностроительных предприятий их изготавливают по единичным технологическим процессам, мало отличающимся по эффективности друг от друга, но зачастую использующим оригинальную оснастку, а в крупносерийном и массовом производстве – и оригинальное технологическое оборудование. При этом прогрессивные высокоэффективные решения, разработанные на каком-либо одном предприятии и потребовавшие больших затрат труда, теряются в огромном разнообразии разработок и практически не находят применения на других предприятиях.

Все перечисленные негативные стороны единичной технологии послужили причиной поиска нового вида технологии, свободной от этих недостатков. Первым шагом в этом направлении явилась разработка типовой технологии, когда в 30-е годы XX века проф. А.П. Соколовский [11] высказал идею типизации технологических процессов.

Типовой технологический процесс характеризуется единством содержания и последовательности большинства технологических операций для группы изделий с общими конструктивными признаками.

В основе типовой технологии лежит классификация изделий на классы – подклассы – группы – подгруппы – типы. Тип представляет собой группу схожих изделий, среди которых выбирается типовой представитель, обладающий наибольшей совокупностью свойств изделий, вошедших в эту группу. На *типовой* представитель разрабатывается типовой технологический процесс, по которому осуществляется изготовление всех изделий этого типа. В случае отсутствия в конкретном изделии той или иной характеристики (например, какой-то поверхности) при разработке рабочего процесса соответствующая операция из типового процесса исключается.

Тем самым типовой процесс в определенной степени разрешает противоречие между большими затратами времени на разработку процесса и малыми сроками на изготовление изделия, так как затраты времени на разработку рабочего технологического процесса для изготовления конкретного изделия резко сокращаются. Разрабатывая на группу деталей, близких по своему конструктивному оформлению, один типовой процесс, можно разработать более совершенный процесс, так как на его проектирование можно затратить больше времени и средств. Пользуясь типовым процессом, рабочий технологический процесс на деталь из группы будет разработан достаточно быстро и качественно.

Типовые процессы позволяют избегать повторных и новых разработок при проектировании рабочих технологических процессов, вследствие чего облегчается труд технолога и сокращаются затраты времени на разработку.

Важное обстоятельство: типовой технологический процесс, приобретая универсальность, одновременно теряет черты индивидуальности. Действительно, типовой технологический процесс изготовления деталей разрабатывается под группу конструктивно схожих деталей, вошедших в один тип. По этому типовому процессу изготавливаются все детали группы, несмотря на то, что они чем-то отличаются друг от друга. В этом и заключается универсальность типового технологического процесса.

Потеря индивидуальности типового процесса заключается в том, что он не учитывает отмеченные выше различия, специфику изделий, вошедших в один тип. Как известно, в каждом типе из группы деталей выбирают типовую деталь, которая отличается наиболее часто встречающимися конструктивными формами, размерами, требованиями к точности и другими показателями качества. Типовая деталь, как правило, наиболее сложная из всех деталей, вошедших в данный тип. Поэтому если бы для каждой детали из этой группы разработать единичный технологический процесс, то он был бы более эффективным, чем типовой процесс, так как он учитывает все особенности детали (иными словами, потеря индивидуальности не позволяет типовому процессу стать оптимальным для каждой детали данной группы).

Чем больше изделия в группе отличаются по своему конструктивному оформлению и требованиям к качеству, тем сильнее отличается типовой процесс от оптимального. Это является одним из ограничений расширения группы изделий под один типовой технологический процесс. В результате изготавливаемые изделия приходится делить на большее число типов, что приводит к росту числа типовых процессов и снижает эффективность типизации.

В целом типовая технология способствует:

- 1) сокращению разнообразия технологических процессов и внесению однообразия в изготовление сходных изделий;
- 2) внедрению и распространению передового опыта и достижений науки и техники;
- 3) упрощению разработки рабочих технологических процессов и сокращению затрат времени на их разработку;
- 4) сокращению разнообразия средств технологического оснащения технологических процессов;
- 5) разработке новых высокоэффективных технологических процессов.

Эффективность единичной и типовой технологий будет разной в зависимости от типа производства. В массовом производстве эффективнее применять единичный технологический процесс, так как он позволяет создать оптимальный технологический процесс, дающий в итоге высокий суммарный экономический эффект.

По мере роста разнообразия выпускаемых изделий, снижения серийности их выпуска, величин партий увеличиваются потери времени, связанные с частыми переналадками технологического оборудования и оснастки. В итоге снижается эффективность производства, повышается себестоимость изготовления изделий. И чем шире выпускаемая номенклатура изделий и меньше их серийность, тем ниже эффективность производства.

В этих условиях возникла задача группирования изделий, отличающихся однородностью технологии изготовления, что позволяет снизить число переналадок оборудования и увеличить размеры партий, поступающих на обработку.

В результате решения этой задачи появился новый вид технологии – групповая технология, основоположником которой является проф. С.П. Митрофанов [9].

Если типовая технология направлена на сокращение трудоемкости технологической подготовки производства, повышение эффективности технологических процессов и распространение прогрессивных решений, то групповая технология предназначена для повышения эффективности производственного процесса.

Групповой технологический процесс – это процесс изготовления группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

Групповой процесс нашел применение в мелкосерийном и серийном производстве. Принципиальная сущность групповой технологии заклю-

чается, прежде всего, в группировании изделий в технологические группы по технологическому подобию.

Групповой технологический процесс разрабатывают на комплексное изделие. В отличие от типового изделия комплексное изделие является "собирательным", часто не существующим в действительности, объединяющим в себе черты большинства изделий, вошедших в группу. Для комплексного изделия разрабатывается технологический процесс и все изделия этой группы, будучи, как правило, проще комплексного изделия, изготавливают по данному технологическому процессу, пропуская отдельные технологические переходы. Все изделия, закрепленные за этим технологическим процессом, изготавливают партиями.

В качестве комплексного изделия технологической группы служит какое-то изделие из группы или искусственно созданное изделие. Например, комплексная деталь формируется следующим образом: берется наиболее сложная деталь, которая включает все поверхности других деталей и, если она не содержит всех поверхностей, содержащихся в других деталях группы, то к ней искусственно добавляют недостающие поверхности.

Различают групповую операцию и групповой технологический процесс. Групповая технологическая операция разрабатывается для выполнения технологически однородных работ при изготовлении группы изделий на специализированном рабочем месте при условии возможности частичной подналадки технологической системы. Групповой технологический процесс представляет собой комплекс групповых технологических операций, выполняемых на специализированных рабочих местах в последовательности технологического маршрута группы изделий, элементов.

Применение групповой технологии особенно эффективно тогда, когда на ее основе в серийном и мелкосерийном производствах удастся создать групповые поточные или даже автоматические линии изготовления изделий или деталей отдельных групп. Создание подобных линий обычно основано на сочетании принципов типизации технологических процессов и групповой обработки, т.е. когда применяется типовой маршрут (например, при обработке заготовок по отдельным групповым операциям, выполняемым на станках с групповыми настройками, и при широком использовании групповых переналаживаемых приспособлений).

Применение групповой технологии тем эффективней, чем больше технологическая группа.

При внедрении групповой технологии возникают трудности, связанные с организацией больших технологических групп не только в связи со сложностью в построении групповых наладок и приспособлений, но и из-за необходимости учета календарного планирования по выпуску изделий.

Изделия, изготавливаемые по групповой технологии, хотя и похожи, но имеют и различия, поэтому за редким исключением избавиться полностью от переналадки оборудования не удастся.

По мере расширения номенклатуры деталей в группе при разработке групповой наладки возрастают ее сложность, количество позиций и время простоя инструментальных позиций. Это ограничивает номенклатуру деталей в группе приводит к росту числа групп и, следовательно, увеличению числа групповых технологических процессов (операций).

Групповая технология оправдывает себя при условии многократного повторения выпуска данной технологической группы изделий. Если повторяемость отсутствует или незначительна, то дополнительные затраты на технологическую подготовку, которые значительно выше по сравнению с единичной технологией, себя не окупают (примером эффективного применения групповой технологии может служить авиационная промышленность, где имеет место высокая повторяемость групп).

Практика внедрения типовых и групповых технологических процессов показывает, что, несмотря на очевидные преимущества, доля их внедрения невысока и до сих пор доминирует единичная технология. Одной из главных причин этого является недостаток классификации изделий на типы, группы, которыми пользуются при разработке типовых и групповых процессов. Анализ этих классификаций показывает, что в обоих случаях в явном или неявном виде в качестве отличительных признаков выступают не конструктивные, а технологические характеристики. Это приводит к тому, что на предприятиях, различающихся составом технологических средств и квалификацией работников, одна и та же номенклатура изделий будет разбита на разные группы. С другой стороны, стоит изменить на предприятии применяемую технологию и оборудование, как придется изменять типы и группы. Чтобы свести к минимуму эти недостатки, надо классифицировать изделия на группы не по технологическим, а конструктивным признакам, что позволит сократить разнообразие типовых и групповых процессов и расширить область их применения. Подводя итог анализу различных видов технологического процесса, можно отметить следующее: применение единичного процесса позволяет разрабатывать оптимальные процессы, но это приводит к большим затратам времени на их разработку;

применение типового технологического процесса снижает объем и сроки технологической подготовки производства, но не обеспечивает оптимального процесса для каждой детали одного типа;

применение группового технологического процесса хотя и увеличивает размер партии, но требует повторяемости выпуска изделий, что существенно снижает область его эффективного применения.

Все три вида технологии не обладают гибкостью, так как не позволяют изменять в случае надобности маршрут.

Одной из главных причин недостатков всех видов технологических процессов является описание изделия на геометрическом уровне, когда деталь представляется совокупностью элементарных геометрических поверхностей, а сборочная единица – совокупностью деталей как геометрических тел.

Это приводит к тому, что технолог, разрабатывая технологический процесс, стремится изготавливать на операциях такие совокупности поверхностей, которые позволяют достичь наибольшей производительности. Однако при этом часто нарушаются связи между поверхностями, обусловленные совместным выполнением функций детали. В результате, во-первых, появляется многовариантность технологического процесса из-за большого числа комбинаций поверхностей, изготавливаемых на операциях, а во-вторых, из-за изготовления функционально связанных поверхностей на разных операциях возникают сложные технологические размерные связи, приводящие к необходимости введения дополнительных операций.

Все это приводит к необоснованному разнообразию технологических процессов, повышению трудоемкости их разработки, вызывают трудности в типизации технологических процессов и в группировании деталей при разработке групповых процессов.

Если же деталь описывать функциональными блоками в виде модулей поверхностей, объединенных совместным выполнением служебных функций, то геометрический признак становится вторичным, а элементарные поверхности входят в состав модулей поверхностей и не являются самостоятельными объектами при разработке технологических процессов.

Учитывая ограниченную номенклатуру МП и их высокую повторяемость, можно существенно снизить разнообразие технологических операций по составу изготавливаемых МП. В итоге упростится разработка технологических процессов, их типизация и группирование деталей при использовании групповых процессов.

Все изложенное справедливо и для сборочных технологических процессов, если сборочную единицу рассматривать как совокупность модулей соединения.

С целью реализации изложенных преимуществ описания изделия как совокупности МП и МС, следует рассматривать построение технологического процесса как компоновку из модулей изготовления МП (МС), входящих в состав детали (сборочной единицы).

В связи с этим процесс получил название модульного технологического процесса, соответственно он может быть единичным, типовым, групповым процессом, и представляет собой результат дальнейшего совершенствования методики разработки технологических процессов, начиная с описания изделия.

Модульный технологический процесс – это технологический процесс, построенный из модулей процессов изготовления МП или МС, входящих в состав изготавливаемого изделия. В основе модульного технологического процесса лежит объективное существование МП и МС, являющихся конструктивными элементами изделий. Узкая номенклатура и ограниченное число описывающих их характеристик открывает путь к типизации конструктивных решений МП, МС, унификации их характеристик и на этой основе разработке модулей технологического обеспечения изготовления МП и получения МС.

В состав модулей технологического обеспечения входят модули технологического процесса (МТИ) изготовления МП и сборочного процесса (МТС) получения МС, модули технологического оборудования (МО), инструментальной наладки (МИ), технологических баз (МТБ), приспособления (МПр) и контрольно-измерительного устройства (МКИ).

Поскольку модульное технологическое обеспечение разрабатывается под типовые МП и МС с унифицированными характеристиками, то оно отличается высоким уровнем обобщения, следовательно, широкой областью применения.

Имея технологическое обеспечение на модульном уровне, модульный технологический процесс изготовления, например, детали, строится следующим образом. Сначала определяется последовательность формирования из заготовки всех МП детали, затем из банка данных вызываются МТИ, МТБ, МО, МИ, МПр, МКИ, необходимые для изготовления каждого МП, затем МТИ объединяются в операции.

Модульный технологический процесс объединяет в себе преимущества единичного, типового и группового технологических процессов. Действительно, модульный технологический процесс разрабатывается

так же, как и единичный технологический, учитывающий все особенности изделия. Однако в отличие от единичного процесса трудоемкость его разработки невысока, так как он строится методом компоновки из имеющихся модулей технологического обеспечения.

Идея типизации в модульном технологическом процессе реализуется на уровне модулей технологического обеспечения, при этом типизация осуществляется более эффективно, так как модули МП и МС в отличие от изделий описываются небольшим числом характеристик.

Например, даже сравнительно простая деталь содержит десятка два поверхностей и имеет большое разнообразие вариантов конструктивного решения. При этом требования к точности и качеству поверхностного слоя у поверхностей такой детали может быть различным, что еще больше увеличивает ее разнообразие. В итоге для изготовления такого множества деталей потребуется большое число типовых технологических процессов.

В отличие от детали МП одного наименования имеет меньшее число вариантов конструктивного решения, содержит, за редким исключением, не более трех поверхностей, что существенно снижает разнообразие МП и уменьшает число типовых модулей технологического процесса.

Идея групповой технологии, заключающаяся в организации технологических групп из разных изделий, в условиях модульной технологии решается наилучшим образом. Дело в том, что в силу ограниченной номенклатуры МП и МС сравнительно просто формировать технологические группы даже в условиях единичного производства, т.е. не требуется повторяемость выпускаемых изделий.

И в заключение отметим, что модульный технологический процесс приобретает некоторую гибкость, позволяя в ограниченных пределах изменять последовательность операций. Это объясняется тем, что в традиционных технологических процессах функционально связанные поверхности детали могут изготавливаться на разных операциях. Например, такие поверхности детали, как торец, отверстие и шпоночный паз, образующие комплект баз (МПБЗ11), могут изготавливаться на разных операциях. В результате между операциями возникают сложные размерные связи, которые нарушаются при изменении последовательности операции, что может привести к браку. Поэтому изменение разработанного маршрутного процесса недопустимо. В модульном же технологическом процессе функционально связанные поверхности детали всегда объединены соответствующим модулем и изготавливаются на одной операции. Это существенно упрощает размерные связи технологического процесса, делает их прозрачными, что позволяет сравнительно просто определять возможность изменения маршрута обработки.

Принципы построения модульных технологических процессов позволяют по-новому строить машиностроительное производство, в основе которого лежит сквозное применение модульного принципа по всей производственной цепочке: изделие – технологические процессы – технологические системы – организация производственного процесса.

1.5.4. ЯВЛЕНИЕ РАССЕЯНИЯ ВЫХОДНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

В ходе технологического процесса непрерывно изменяются качественные характеристики технологической системы, действующие факторы, характеристики заготовок и деталей, поступающих на вход технологической системы, и др. Все это в итоге приводит к появлению отклонений качества изготовленного изделия, затрат времени на его изготовление и себестоимости от заданных значений.

Если, например, обработать партию деталей на станке и измерить размер каждой детали, то все они будут иметь разные размеры. Совпадение размеров у двух деталей объясняется погрешностями измерения. Если же произвести измерение с большей точностью, то удастся уловить разницу между этими размерами. Описанное явление получило название явления рассеяния.

При изучении явления рассеяния характеристик технологических процессов получили распространение две формы графического отображения этого явления: точечная диаграмма и кривая рассеяния.

Точечная диаграмма строится следующим образом. По оси ординат откладываются значения выходного показателя, по оси абсцисс – номер изделия (рис. 1.5.3). Преимущество такой формы отображения явления рассеяния заключается в возможности наблюдения динамики изменения выходного показателя.

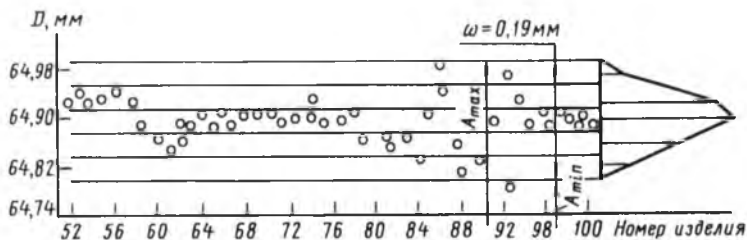


Рис. 1.5.3. Точечная диаграмма изменения диаметра в партии деталей

Построение кривой рассеяния осуществляется следующим образом. На точечной диаграмме через $A_{\max}$ и $A_{\min}$ значения выходного показателя проводят линии, параллельные оси абсцисс и делят расстояние между ними на n одинаковых интервалов. Из середин интервалов восстанавливают перпендикуляры к линии, проведенной параллельно оси ординат, и на каждом перпендикуляре откладывают отрезок, пропорциональный количеству значений выходного показателя, попавших в данный интервал. Соединив концы отрезками в виде ломаной линии, получим фактическую кривую рассеяния выходного показателя технологического процесса. Если количество интервалов будет бесконечно большой величиной, то получим плавную кривую рассеяния.

Для количественной оценки рассеяния выходных показателей пользуются характеристиками математической статистики и теории вероятностей. Основной числовой характеристикой является величина поля рассеяния $\omega = A_{\max} - A_{\min}$ (здесь A – значение выходного показателя).

К другим характеристикам кривой рассеяния относятся ее форма, центр группирования случайной величины и мера рассеяния характеристики относительно центра группирования.

Под *центром группирования* понимается среднее значение случайной величины, около которой группируются остальные ее значения. Если случайная величина дискретна, то центр группирования

$$M(x) = \sum x_i p(x_i),$$

где x_i – значение i -го интервала; $p(x_i)$ – частость или число значений случайной величины, попавших в один интервал, %. Если случайная величина непрерывна, то

$$M(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x \varphi(x) dx.$$

Однако знание положения центра группирования недостаточно для оценки кривой рассеяния выходного показателя. При одном и том же значении центра группирования кривые рассеяния могут иметь различную форму (рис. 1.5.4). В этом случае чтобы оценить различие кривых рассеяния, необходимо определить их меры рассеяния. Мера рассеяния дает представление о том, как плотно значения случайной величины группируются вокруг центра группирования.

За меру рассеяния отклонений случайной величины относительно центра группирования принимают среднее отклонение; среднее квадратическое отклонение; срединное (вероятное) отклонение; дисперсию, медиану и другие. Часто для упрощения расчетов в качестве меры рассеяния используют среднее квадратическое отклонение σ .

Для дискретной случайной величины x

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m [x_i - M(x)]^2 p(x_i)};$$

для непрерывной случайной величины,

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} [x - M(x)]^2 \varphi(x) dx}.$$

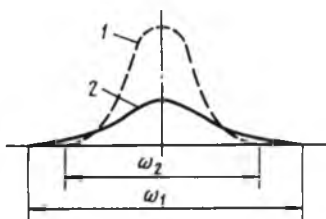


Рис. 1.5.4. Кривые рассеяния случайной величины:

$$1 - \omega_1 = 6\sigma_1; \quad 2 - \omega_1 = 6\sigma_2;$$

$$\sigma_1 < \sigma_2$$

Чем больше σ , тем менее плотно группируются значения случайной величины относительно центра группирования.

Как правило, при большом числе изделий в партии больше вероятность того, что рассеяние значений выходного показателя будет подчиняться нормальному закону распределения (закону Гаусса). В этом случае, если поле рассеяния ω ограничить величиной, равной 6σ , то число значений выходного показателя, вышедших за пределы 6σ , составит 0,27 %.

В реальных условиях фактические кривые рассеяния, как правило, отличаются от кривой нормального распределения, нередко очень существенно. Объясняется это тем, что факторы, вызывающие отклонения выходного показателя, значительно отличаются один от другого по величине и степени воздействия. Рассмотрим некоторые характерные случаи. На рис. 1.5.5 видно, что на участке $0 - a$ в результате действия многочисленных факторов рассеяние полученного размера A подчиняется закону нормального распределения, а на участке $a - b$ точечная диаграмма смещена на величину h , что обусловлено действием систематического фактора, постоянного по величине (примером может служить процесс

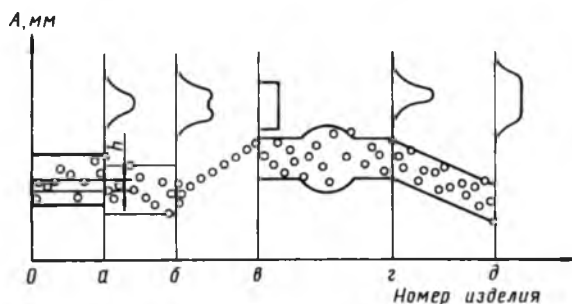


Рис. 1.5.5. Точечные диаграммы, отражающие действия различных факторов

развертывания отверстий в деталях, когда сломанную развертку заменяют новой, имеющей другой фактический диаметр). Если для выборки 0–б построить кривую рассеяния, то она будет иметь "двугорбый" вид. На участке б–в наблюдается систематическое изменение размера, близкое к линейному (примером является действие изнашивания шлифовального круга). Кривые рассеяния для выборки на участке б–в будут подчиняться закону равной вероятности. Для участка в–г характерно влияние доминирующего случайного фактора (например, если среди заготовок оказалась партия заготовок, полученных на другом, уже изношенном штампе, имеющем большие размеры, то эта партия заготовок будет иметь больший разброс припуска), а кривая рассеяния будет близка к закону нормального распределения.

Изменения на участке г–д, обусловленные совокупным действием случайных факторов и одного систематического, подчиняющегося линейному закону, будут иметь кривую рассеяния размера, близкую по форме к трапеции.

Для определенных условий технологического процесса, например при обработке партии деталей на станке, рабочий, чтобы не допустить неисправимый брак, старается уменьшить вероятность выхода размера детали за нижнюю границу допуска. В этом случае кривая рассеяния размера получается в виде асимметричной кривой с центром группирования, смещенным в сторону верхней границы допуска на размер (рис. 1.5.6, а).

Кривая рассеяния какой-либо характеристики, являющейся положительной величиной (например, эксцентриситет), при действующих случайных факторах имеет вид кривой нормального распределения, расположенной в квадрате положительных значений (рис. 1.5.6, б).

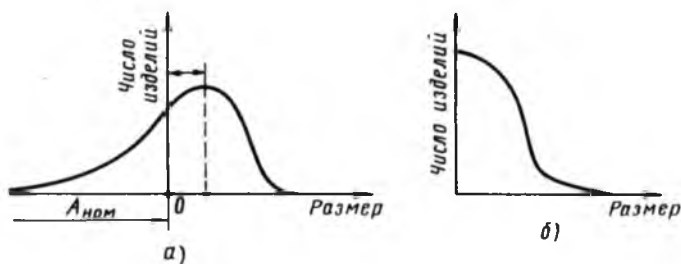


Рис. 1.5.6. Кривые рассеяния:

а – при стремлении рабочего не допустить неисправимый брак;
б – положительной величины

При длительном времени действия технологического процесса факторы, влияющие на него, изменяются по составу, величине и направлению. То один, то другой фактор в течение какого-то времени может стать доминирующим, поэтому в общем случае распределение выходных показателей технологического процесса во времени непрерывно изменяется.

Отклонение выходного показателя технологического процесса для конкретного *i*-го изделия (рис. 1.5.7), равно алгебраической сумме отклонений, вызванных действием каждого фактора, т.е.

$$H_i = H_n + \Delta\omega_i + \Omega_{i_i}$$

где H_n – номинальное значение выходного показателя; $\Delta\omega_i$ – отклонение *i*-го изделия, обусловленное совокупным действием систематических факторов; Ω_{i_i} – отклонение *i*-го изделия, обусловленное совокупным действием случайных факторов.

К основным числовым характеристикам рассеяния выходного показателя технологического процесса при изготовлении партии изделий относят поле рассеяния ω , координату $\Delta\omega$ середины поля рассеяния, координату $M(x)$ центра группирования, параметры, характеризующие кривую рассеяния (среднеквадратическое отклонение, дисперсию, коэффициент относительной асимметрии, медиану и др.).

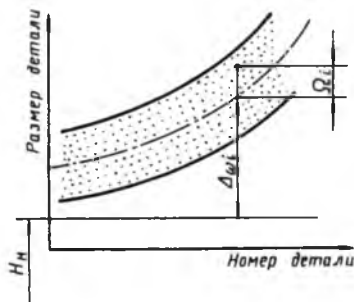


Рис. 1.5.7. Схема базирования размера *i*-го изделия

1.5.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗМЕРНЫЕ СВЯЗИ

При обработке заготовки или сборке изделия соответственно заготовка, деталь, сборочная единица должны занять определенное положение в технологической системе и быть лишены относительно ее базирующих элементов всех степеней свободы; для этого они должны иметь полный комплект технологических баз. Однако в ряде случаев, когда технологические базы совпадают с конструкторскими, они не имеют полного комплекта баз. Как правило, это бывает тогда, когда деталь или сборочная единица в зависимости от своего назначения имеет в изделии одну или несколько степеней свободы.

Если, например, вал в изделии должен вращаться вокруг своей оси, то для лишения его остальных пяти степеней свободы достаточно пяти опорных точек (рис. 1.5.8). В этом случае оставшиеся пять опорных точек образуют две базы: двойную направляющую (точки 1, 2, 3, 4) и опорную базу (точка 5). Отсутствие одной базы оставляет валу возможность вращаться вокруг своей оси.

Если вал должен вращаться и поступательно перемещаться, то он должен опираться на четыре опорные точки для лишения четырех степеней свободы, образующих двойную направляющую базу, оставляя валу две степени свободы.

В случаях, когда у детали отсутствует полный комплект основных баз, возникает противоречие между необходимостью наличия у детали соответствующего числа степеней свободы и необходимостью лишения ее всех степеней свободы при изготовлении. Чтобы устранить указанное противоречие и удовлетворить требования технологии, т.е. довести число опорных точек и баз до полных комплектов, применяют скрытые базы.

Однако на практике применять скрытые базы неудобно. Чтобы сократить затраты времени на базирование и повысить его точность, воображаемые базы и опорные точки материализуют с помощью явных баз.

Их материализация осуществляется посредством создания реальных поверхностей или разметочных линий и точек, представляющих собой следы пересечения координатных плоскостей.

В процессе обработки заготовки или сборки изделия имеет место такое явление, как смена технологических баз.

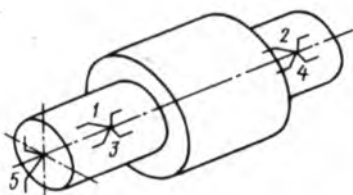


Рис. 1.5.8. Эскиз ступенчатого вала

Смена баз – это замена одних баз другими с сохранением их принадлежности к конструкторским, технологическим или измерительным базам. Смена баз может быть организованной (преднамеренной), при которой соблюдаются определенные условия, или неорганизованной – происходит случайно, без соблюдения необходимых условий. Причинами неорганизованной смены баз являются: неправильный выбор в качестве баз поверхностей заготовки (детали изделия), погрешности геометрических форм поверхностей и их расположения; неправильное создание силового замыкания и др.

На рис. 1.5.9 показано, как происходит смена баз при базировании в тисках детали, у которой поверхность *А* не параллельна поверхности *Б*.

До действия силы *Р* деталь занимает положение, как показано на рис. 1.5.9, *а*.

Под действием момента от силы *Р* деталь поворачивается в тисках вокруг точки *О*, и в результате направляющая база превращается в установочную, а установочная база – в направляющую (рис. 1.5.9, *б*).

Вследствие наличия погрешностей геометрических форм поверхностей баз возникает неопределенность и в расположении опорных точек на базах. В реальных условиях, если не предусмотреть необходимых мер, расположение опорных точек на установочной и направляющей базах может существенно отличаться от желаемого.

Смена баз всегда связана с заменой в размерной цепи одного звена двумя новыми. Так, например, если за технологическую базу корпусной детали, у которой положение оси отверстия в вертикальном направлении задано относительно основания (рис. 1.5.10), принять то же основание детали, то сразу получается размер A_{Δ} , а если за технологическую базу принять противоположную поверхность, то вместо размера A_{Δ} получаем B_{Δ}

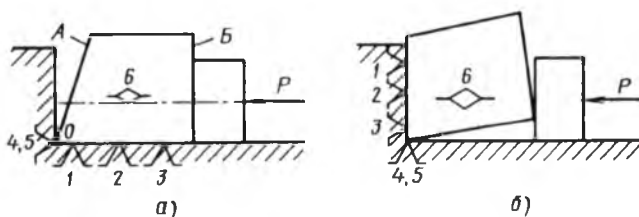


Рис. 1.5.9. Схема базирования детали в тисках:

а – в момент приложения силы *Р*; *б* – после приложения силы *Р*;
1 – 3 – опорные точки

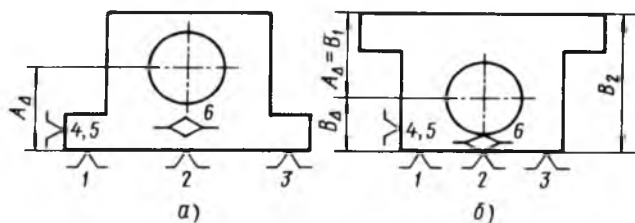


Рис. 1.5.10. Схема базирования корпусной детали.

Конструкторская установочная база с технологической базой:

a – совпадает; *б* – не совпадает

и размерную цепь с размерами B_Δ , B_1 и B_2 (рис. 1.5.10, б), откуда $A_\Delta = B_1 = B_2 - B_\Delta$ и $\omega_{A_\Delta} = \omega_{B_1} + \omega_{B_2}$. Таким образом, при смене технологической базы происходит увеличение погрешности обработки. Если в первом случае (рис. 1.5.10, а) технологическая установочная база совпадает с конструкторской, то погрешность, получаемая при обработке отверстия в партии деталей $\omega_{A_\Delta} = \omega_{т.с}$ ($\omega_{т.с}$ – погрешность, вносимая технологической системой), а во втором случае (рис. 1.5.10, б) погрешность ω_{A_Δ} увеличивается на погрешность размера B_2 , полученного при обработке верхней поверхности.

Поэтому для достижения заданной точности размера A_Δ во втором случае следует допуски на размеры B_1 и B_2 ужесточить таким образом, чтобы их сумма была равна допуску на размер A_Δ .

При разработке технологических процессов нередко приходится менять технологические базы, обусловленные, например, невозможностью обработки всех поверхностей детали за одну установку или облегчения измерения ее точности и др. В этом случае смена баз является организованной. При организованной смене баз необходимо выполнить следующее:

- 1) построить размерные цепи линейных и угловых размеров, замыкающими звеньями которых будут линейный и угловой размеры между вновь получаемой поверхностью при выполнении перехода и поверхностью предыдущей технологической базы;

- 2) рассчитать номинальные размеры, допуски и координаты середины полей допусков составляющих звеньев;

- 3) выполнить первые два условия в тех координатных плоскостях, в которых происходит смена баз.

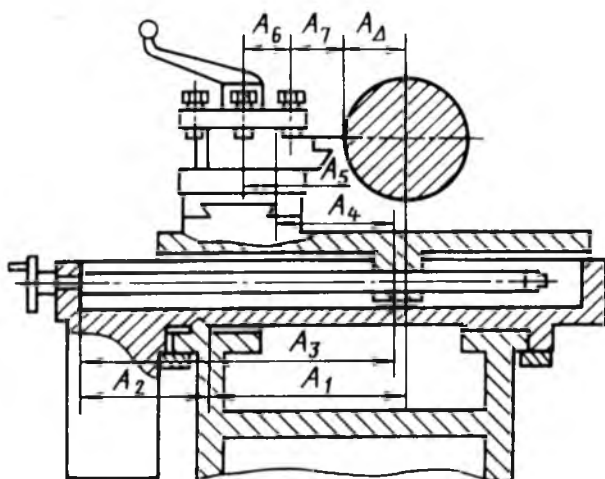


Рис. 1.5.11. Размерная цепь первого вида на примере токарного станка

Итак, в процессе обработки заготовок или сборки изделия действуют технологические размерные цепи, с помощью которых решаются задачи достижения точности изделий в процессе их сборки и точности деталей в процессе их изготовления.

Технологические размерные цепи бывают двух видов: 1) размерная цепь технологического перехода; 2) размерная цепь технологического процесса.

В технологической размерной цепи первого вида замыкающим звеном является расстояние между рабочими кромками инструмента и технологическими базами заготовки, а составляющими звеньями – размеры деталей технологической системы, на которой обрабатывается заготовка. На рис. 1.5.11 показана технологическая размерная цепь первого вида, когда заготовка обрабатывается на токарном станке.

Из рис. 1.5.11 следует, что замыкающим звеном A_{Δ} технологической размерной цепи является расстояние между вершиной резца и осью заготовки, т.е. ее технологической базой, а уравнение размерной цепи имеет вид:

$$A_{\Delta} = A_1 + A_2 - A_3 + A_4 + A_5 - A_6 - A_7.$$

В тех случаях, когда заготовка обрабатывается на нескольких операциях, т.е. проходит через несколько технологических систем, действует технологическая размерная цепь второго вида. Замыкающим звеном этой размерной цепи является получаемый размер детали, а составляющими звеньями являются размеры, получаемые в результате осуществления технологических переходов. Пример технологической размерной цепи второго типа показан на рис. 1.5.12, где замыкающим звеном является ширина Γ_{Δ} буртика вала. Утолщенными линиями показаны поверхности, получаемые на соответствующих технологических переходах. На первом переходе подрезают правый торец и получают размер A_{Δ} – расстояние между полученным торцом и технологической базой; на втором переходе обрабатывают длинную ступень вала и получают размер B_{Δ} – расстояние между полученным торцом и технологической базой; на третьем переходе после переворота заготовки обрабатывают короткую ступень и получают размер B_{Δ} – расстояние между полученным торцом технологической базой. В итоге получилась технологическая размерная цепь второго вида

$$\Gamma_{\Delta} = \Gamma_1 - \Gamma_2 + \Gamma_3,$$

где $\Gamma_1 = B_{\Delta}$, $\Gamma_2 = A_{\Delta}$, $\Gamma_3 = B_{\Delta}$.

Как следует из уравнения размерной цепи, погрешность ширины буртика

$$\omega_{\Gamma_{\Delta}} = \omega_{\Gamma_1} + \omega_{\Gamma_2} + \omega_{\Gamma_3}.$$

Технологические размерные цепи второго вида зависят от того, как

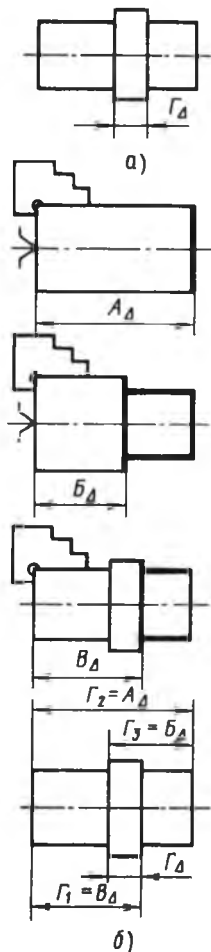


Рис. 1.5.12. Технологическая размерная цепь Γ второго вида: а – деталь; б – размерная цепь

выбраны технологические базы. При выборе технологических баз используют один из двух принципов: принцип совмещения баз или принцип единства баз.

Принцип совмещения баз состоит в том, что в качестве технологической базы выбирают конструкторскую базу, от которой задан получаемый размер.

Несовпадение технологической базы с конструкторской приводит к накопленной погрешности на получаемом размере.

Для иллюстрации изложенного рассмотрим два варианта получения ширины уступа A_Δ . На рис. 1.5.13, *а* показана готовая деталь с указанием ширины уступа, заданной от правого торца (конструкторская база). При базировании заготовки по левому торцу (технологическая база не совпадает с конструкторской базой) получены размеры A_1 и A_2 (рис. 1.5.13, *б*). В этом случае ширина уступа получается как замыкающее A_Δ звено размерной цепи, представленной на рис. 1.5.13, *в*, где $A_\Delta = A_1 - A_2$. Тогда погрешность обработки ширины уступа в партии деталей

$$\omega_{A_\Delta} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2}.$$

В свою очередь погрешности звеньев A_1 и A_2 являются результатом погрешностей, возникающих на составляющих звеньях размерных цепей технологической системы (фрезерование плитки в размер A_1 и фрезерование уступа с получением размера A_2). Если же на второй операции базировать по правому торцу (рис. 1.5.13, *г*), то накопления погрешностей не будет, так как в данном случае технологическая база совпадает с конструкторской и вместо размера A_2 будет получен A_Δ . В качестве другого примера, на рассматриваемом выше рис. 1.5.12, приведена технологическая

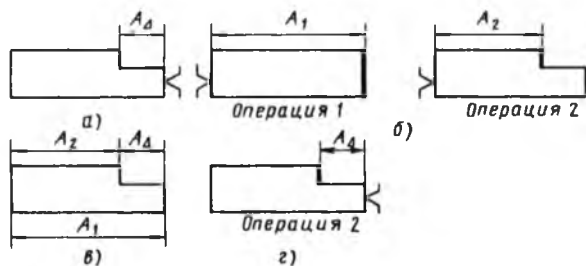


Рис. 1.5.13. Пример образования ширины уступа:

- а* – деталь; *б* – положение уступа при несовпадении технологической базы с конструкторской; *в* – технологическая размерная цепь второго вида; *г* – получение уступа при совпадении технологической базы с конструкторской

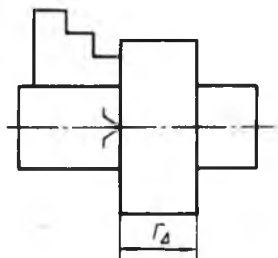


Рис. 1.5.14. Получение на валу ширины буртика

размерная цепь получения у вала ширины буртика. Если воспользоваться принципом совмещения баз, то надо, чтобы при подрезке торца буртика на последнем переходе технологическая опорная база совпала с конструкторской базой. Тогда погрешность ширины буртика получается равной погрешности на последнем переходе и не зависит от погрешностей размеров, получаемых на предыдущих переходах (рис. 1.5.14).

Принцип единства баз заключается в том, что в качестве технологических или

измерительных баз на различных операциях технологического процесса используют одни и те же поверхности детали. Применение принципа единства баз позволяет исключить появление погрешностей обработки и сборки, связанных со сменой баз.

Особое значение приобретает использование принципа единства баз при обработке заготовки для получения заданной точности угловых размеров поверхностей детали, так как в станках, как правило, отсутствуют механизмы получения точности угловых размеров методом регулировки.

При соблюдении принципа единства баз рекомендуется за технологические или измерительные базы принимать не только одни и те же поверхности, но и одни и те же участки поверхностей, что позволяет свести к минимуму влияние отклонений геометрической формы поверхностей технологических баз на погрешность установки. С этой целью все установочные элементы приспособлений, применяемые на различных операциях, должны располагаться в одних и тех же точках координатной системы, построенной на технологических базах, а при измерении – на измерительных базах.

Различие между принципами совмещения и единства баз можно проиллюстрировать на примере детали (рис. 1.5.15) с несколькими отверстиями, оси которых заданы последовательно одна относительно другой, как показано на рис. 1.5.15, а. Если соблюдать принцип совмещения баз (рис. 1.5.15, а), то при обработке отверстия I технологической базой, относительно которой получают координату оси отверстия I, будут основанные детали. Для обработки отверстия II за технологическую базу следует

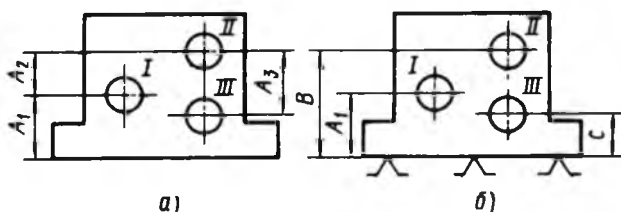


Рис. 1.5.15. Схемы простановки координатных размеров отверстий корпусной детали в вертикальной плоскости при использовании принципа:
а – совмещения баз; *б* – единства баз

выбрать ось отверстия *I*, и для обработки отверстия *III* технологической базой должна быть ось отверстия *II*. Если соблюдать принцип единства баз, то координаты осей всех отверстий по вертикали будут обеспечиваться от одной технологической базы, в качестве которой, например, принято основание детали (рис. 1.5.15, *б*).

Принятие того или иного принципа зависит от конкретных условий. Например, если требования к точности очень высоки и не возникает трудностей при использовании конструкторской базы в качестве технологической, то целесообразно применять принцип совмещения баз. Если заданная точность может быть достигнута и экономически оправдана от одной технологической базы, то целесообразно воспользоваться принципом единства баз.

Цепной и координатный методы получения и измерения линейных и угловых размеров поверхностей деталей. В основе этих методов лежит применение принципов совмещения и единства баз. Сущность цепного метода сводится к тому, что каждый последующий линейный или угловой размеры поверхностей детали, получают или измеряют от ранее полученного или измеренного размера (рис. 1.5.16, *а*). При получении каждого последующего размера происходит переход к новой технологической или измерительной базе. Следовательно, погрешность, образующаяся на каждом цепном звене, не зависит от погрешностей предыдущих цепных звеньев. Это является основным преимуществом цепного метода.

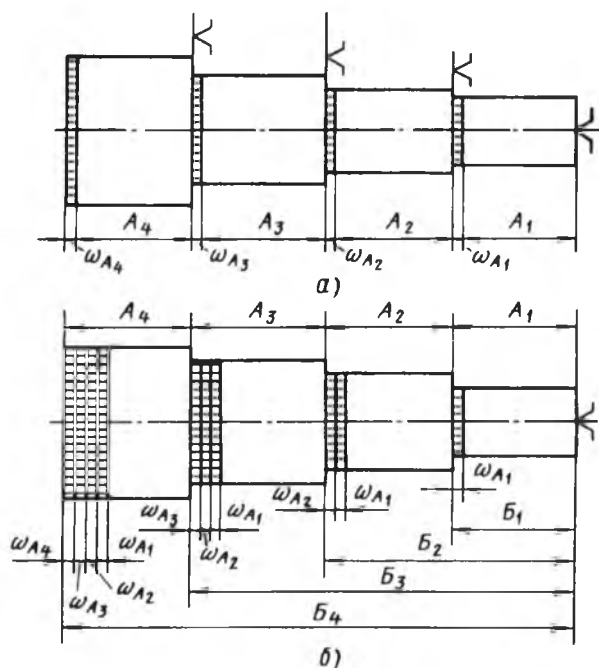


Рис. 1.5.16. Схемы простановки размеров:
 а — цепным методом; б — координатным методом

Сущность координатного метода заключается в том, что все размеры и повороты поверхностей детали получают или измеряют от одной и той же базы независимо один от другого (рис. 1.5.16, б), т.е. используется принцип единства баз. Из рис. 1.5.16, б видно, что погрешность на координатном звене представляет собой сумму погрешностей цепных звеньев, которые оно включает, а именно:

$$\omega_{B_1} = \omega_{A_1}; \quad \omega_{B_2} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2};$$

$$\omega_{B_3} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2} + \omega_{A_3}; \quad \omega_{B_4} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2} + \omega_{A_3} + \omega_{A_4}.$$

Координатный метод имеет следующие особенности:

– погрешность каждого из координатных звеньев не зависит от погрешностей других координатных звеньев;

– погрешность любого цепного звена равна сумме погрешностей двух координатных звеньев, его образующих:

$$\omega_{A_2} = \omega_{B_1} + \omega_{B_2}; \quad \omega_{A_3} = \omega_{B_2} + \omega_{B_3};$$

$$\omega_{A_4} = \omega_{B_3} + \omega_{B_4}.$$

Итак, сопоставляя оба метода, можно отметить, что возможная погрешность на координатном звене будет наибольшей при цепном методе, а при координатном методе измерения погрешность на цепном звене не превысит суммы погрешностей двух координатных звеньев. На практике часто применяют комбинированный метод. Если на отдельных звеньях требуется обеспечить высокую точность, то используют цепной метод, а если требуется уменьшить накопленную погрешность, то – координатный.

Измерительные размерные цепи, как и технологические, бывают двух типов. К *первому типу* относится измерительная размерная цепь, замыкающим звеном которой является расстояние между измерительной базой и поверхностью (рис. 1.3.19). К *второму типу* относится измерительная размерная цепь, составляющими звеньями которой являются размеры детали (рис. 1.5.17), когда контролируемый размер не представляется возможным измерить непосредственно.

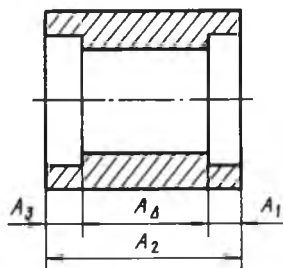


Рис. 1.5.17. Измерительная размерная цепь второго типа

1.5.6. ВРЕМЕННЫЕ ЦЕПИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Временные цепи (как и технологические размерные цепи) бывают двух видов: 1) – временная цепь технологической операции; 2) – временная цепь технологического процесса.

Во временной цепи первого вида замыкающим звеном является время, затрачиваемое на осуществление технологического перехода, в цепи второго вида – время, затрачиваемое на осуществление всего технологи-

ческого процесса. В качестве технологической операции могут выступать процессы обработки поверхности заготовки, соединения деталей, измерение точности и др. В этих случаях составляющими звеньями временной цепи будут затраты времени на установку и снятие предмета труда, подвода и отвода инструмента, время рабочего процесса и т.п.

Во временной цепи второго типа составляющими звеньями будут затраты времени на операции, составляющие технологический процесс.

Технологический процесс, как правило, состоит из нескольких операций, и время на его осуществление складывается из затрат времени на операции, на перемещения заготовки (детали, сборочной единицы) от одной технологической системы к другой с учетом ее пролеживания.

На рис. 1.5.18, а "квадратиками" показаны m станков для изготовления деталей, расставленных по ходу технологического процесса. Известны значения штучно-калькуляционного времени по операциям ($t_{шт.к}$) и циклы обработки заготовок на каждом станке $t_{ц1}, t_{ц2}, t_{ц3}, \dots, t_{цm}$ и затраты времени на передачу заготовки от первого станка ко второму $t_{п1}$, от второго станка к третьему $t_{п2}$ и т.д. Затраты времени, связанные с изготовлением изделия (детали), подсчитывают следующим образом.

Продолжительность изготовления детали по всему технологическому процессу (рис. 1.5.18, б):

$$T_{\Delta} = \sum_{i=1}^m t_{шт.к\ i} + \sum_{i=1}^{m-1} t_{п\ i}, \quad (1.5.1)$$

где $t_{шт.к\ i}$ – штучно-калькуляционное время i -й операции; $T_{п}$ – время на передачу заготовки от i -го станка к станку $(i+1)$; m – число станков.

Календарный промежуток времени ($T_{пр}$) изготовления детали по всему технологическому процессу (рис. 1.5.18, в):

$$T_{пр} = \sum_{i=1}^m t_{ц\ i} + \sum_{i=1}^{m-1} t_{п\ i}. \quad (1.5.2)$$

Цикл технологического процесса изготовления детали определяется как наибольшая величина цикла $T_{ц\ max}$. Такт T_{Ti} выпуска i -й детали определяется как величина замыкающего звена временной цепи (рис. 1.5.18, г):

$$T_{Ti} = T_{ц\ i} + T_{ц\ (i+1)} - T_{ц\ i}, \quad (1.5.3)$$

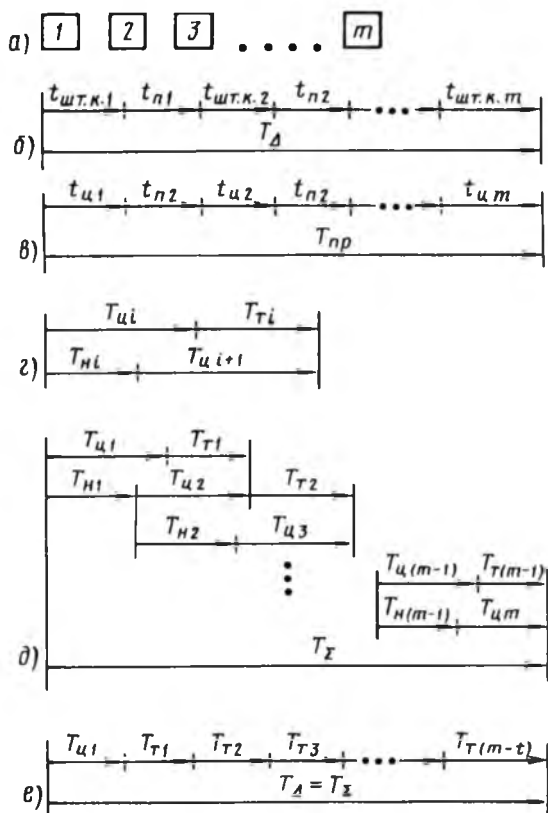


Рис. 1.5.18. Временные цепи технологического процесса:

а – схема расположения станков; б – временная цепь продолжительности технологического процесса; в – временная цепь календарного промежутка времени изготовления деталей; г – временная цепь такта выпуска i -й детали; д, е – временные цепи продолжительности изготовления партии деталей

где T_{Hi} – промежуток времени, через который должен начаться цикл обработки следующей заготовки; при этом, например, первый станок освободится от обработки предыдущей заготовки только через промежуток времени $T_{Hi} \geq T_{ц(i)} + T_{н(i)}$; $i, (i+1)$ – номера циклов; $T_{ц(i+1)}$ – цикл обработки детали $(i+1)$; $T_{цi}$ – цикл обработки предыдущей детали.

Для нахождения величины календарного промежутка времени изготовления всей партии деталей T_{Σ} следует построить временную цепь, составляющими звеньями которой будут значения тактов. На рис. 1.5.18, δ показана последовательность построения временных цепей тактов выпуска всех деталей в количестве k штук. Эту временную цепь можно привести к виду временной цепи, показанной на рис. 1.5.18, e :

$$T_{\Sigma} = T_{u(1)} + \sum_{i=1}^{k-1} T_{\tau i} . \quad (1.5.4)$$

Решая (1.5.4) относительно T_{τ} , получим, что такт выпуска изделия, позволяющий обеспечить заданную программу за планируемый календарный промежуток времени:

$$T_{\tau} = \frac{T_{\Sigma} - T_{u(1)}}{k - 1} . \quad (1.5.5)$$

Если принять $T_{\Sigma} = F$ (здесь F – календарное время), то получим

$$T_{\tau} = \frac{F - T_{u(1)}}{k - 1} \eta , \quad (1.5.6)$$

где η – коэффициент использования календарного времени.

Из (1.5.6) следует, что на величину такта выпуска оказывает влияние не только число деталей, подлежащих изготовлению, но и календарный промежуток времени изготовления изделия по всему технологическому процессу.

В зависимости от поставленной задачи замыкающим звеном временной цепи может быть продолжительность или цикл перехода, операции, технологического процесса.

Как и в размерных цепях, у звена временной цепи в случае повторяющихся переходов, операций, технологических процессов наблюдается явление рассеяния.

На рис. 1.5.19 в качестве примера показаны точечная диаграмма (a) и гистограмма (b) распределения такта выпуска 100 штук корпуса клапана на шестишпиндельном токарном автомате мод. 1265М. Из рис. 1.5.19 видно, что поле рассеяния такта достигает ~10 % от его номинального значения – 900 с. При обработке на оборудовании с ручным управлением поле рассеяния, как правило, значительно больше из-за больших колебаний затрат времени на вспомогательные переходы.

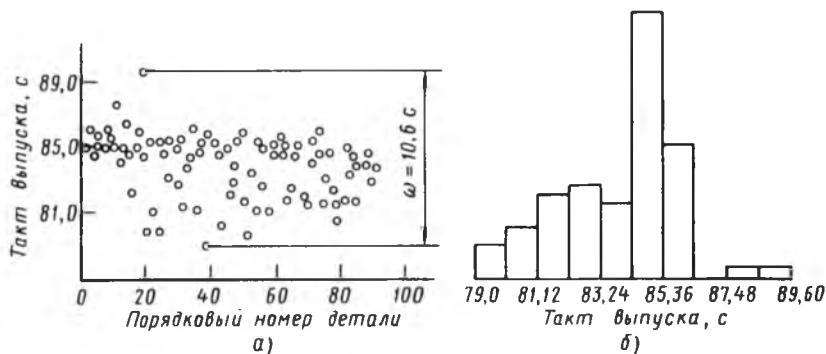


Рис. 1.5.19. Рассеяние величины такта выпуска партии корпуса клапана на шестишпиндельном токарном автомате 1265М:

а – точечная диаграмма такта выпуска; *б* – гистограмма такта выпуска

При обработке на неавтоматизированной технологической системе перемещения исполнительных органов в значительной степени зависят от работы оператора, а скорости перемещений обусловлены частично оператором, частично соответствующими механизмами. Например, при работе токарного станка рабочий вручную подводит резец к заготовке, а затем включает механическую подачу. При обработке партии заготовок холостые перемещения резца, его скорость, время включения и выключения механической подачи непостоянны.

При автоматической обработке перемещения и скорости рабочих органов формируются системой управления. Например, система управления силовой головки должна обеспечивать следующий цикл: быстрый подвод – рабочий ход – быстрый отвод. Для этого производят настройку системы управления.

Как правило, система управления (СУ) имеет программноноситель, считывающие и передаточно-преобразующие устройства, исполнительные механизмы. В силовой головке функции программноносителя, например, выполняют два жестких упора, установленных на подвижной части силовой головки; считывающим устройством является путевой переключатель, закрепленный на неподвижной части силовой головки. Программноноситель и считывающее устройство настраивают по положению ин-

струмента и заготовки. С помощью соответствующих регуляторов устанавливают заданные скорости рабочих органов.

Ошибки в установке программоносителя, считывающего устройства, задании скоростей движения и составляют ошибку статической настройки СУ, которая вызовет отклонение фактических затрат времени на цикл от расчетных значений. Во время работы силовой головки действуют силы трения, инерции, силы резания, выделяется теплота, колеблется напряжение в электрической сети, наблюдаются вибрации, неравномерность движений рабочего органа, происходит выбор зазоров в кинематических цепях, упругие и тепловые перемещения. Все это нарушает первоначальное положение элементов СУ, в результате чего фактические значения скоростей и перемещений отличаются от заданных.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что должно входить в состав элементной базы технологических процессов?
2. Перечислите виды технологических процессов.
3. Единичный технологический процесс, его преимущества и недостатки, область применения.
4. Типовой технологический процесс, его преимущества и недостатки, область применения.
5. Групповой технологический процесс, его преимущества и недостатки, область применения.
6. Модульный технологический процесс и его преимущества.
7. Сущность явления рассеяния.
8. Две формы отображения явления рассеяния.
9. Количественные характеристики явления рассеяния.
10. Что понимается под сменой баз?
11. Какие необходимо выполнить условия при организованной смене баз?
12. Технологическая цепь первого вида (привести пример).
13. Технологическая цепь второго вида (привести пример).
14. В чем разница между принципами совмещения баз и единства баз?
15. В чем разница между временными цепями первого и второго вида?

Глава 1.6

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЯ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Одним из важнейших выходных показателей технологического процесса является качество изготовленного изделия. Чтобы разработанный технологический процесс обеспечивал заданный уровень качества изделия, разработчик должен знать закономерности образования отклонений характеристик качества изделия. Это позволит как на этапе разработки технологического процесса, так и во время его осуществления предпринимать соответствующие меры по сокращению погрешностей и достижению заданного качества.

1.6.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЯ

Формирование заданного качества изделия осуществляется в результате механического и физико-химического воздействия на предмет труда через рабочий процесс. При рабочем процессе на предмет труда действуют усилия, теплота, химические реакции. Под их воздействием происходит качественное преобразование предмета труда, и чем выше степень воздействия, тем большие качественные изменения происходят с предметом труда. Это происходит как при непосредственном осуществлении рабочего процесса, так и во время нахождения предмета труда между операциями. Поэтому следует рассматривать формирование качества изделия как во время осуществления технологического перехода, так и на протяжении всего технологического процесса.

Рабочий процесс осуществляется с помощью соответствующей технологической системы, которая находится под воздействием различных факторов. Реакция технологической системы на указанные воздействия приводит к нарушению заданного режима рабочего процесса и, как следствие, к отклонению качества изделия (рис. 1.6.1). Согласно этой схеме при осуществлении рабочего процесса действующие вспомогательные и сопутствующие процессы, окружающая среда порождают многочисленные факторы $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k$, которые нарушают заданный закон относительного движения или положения рабочих поверхностей. В итоге появляются отклонения качества изделия от его номинального значения.

Технологическая система препятствует воздействию этих факторов вследствие наличия качества, образуемого такими свойствами, как жест-

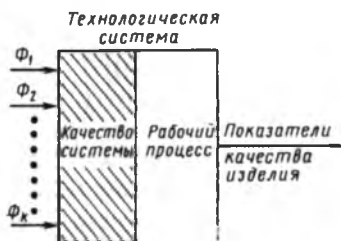


Рис. 1.6.1. Схема процесса формирования качества изделия

кость, прочность, износостойкость, теплоустойкость, виброустойчивость и др. И чем выше качество технологической системы, тем меньше влияние факторов на отклонение показателей качества изготовления изделия.

Независимо от вида технологической системы, будь то сборочная машина или обрабатывающая технологическая система, механизм образования качества

изделия подчиняется вышеприведенным положениям.

Одним из важнейших показателей качества изделия является его геометрическая точность. Значения геометрических погрешностей зависят от величин действующих факторов и уровня качества технологической системы. Процесс образования погрешности заключается в преодолении действующим фактором сопротивления технологической системы, оказываемого ею с помощью соответствующего качества.

Рассмотрим цепочку причинно-следственных связей этого механизма. Наличие большого разнообразия действующих факторов, условий изготовления, порождающих геометрические погрешности изделия, затрудняет изучение причинно-следственных связей механизма их образования.

Многочисленные исследования показали, что большинство первичных факторов действуют косвенно или непосредственно через теплоту и усилия. Тепловое и силовое воздействие порождает упругие и тепловые перемещения, вибрации, изнашивание, деформации элементов технологических систем, обусловленные остаточными напряжениями, что нарушает заданные параметры режима рабочего процесса и в итоге приводит к отклонению фактического относительного движения рабочих поверхностей системы от заданного (рис. 1.6.2). Кроме того, на геометрические погрешности изготовления оказывает влияние геометрическая неточность самой технологической системы. Рассмотрим механизмы образования упругих, тепловых перемещений, изнашивания, остаточных напряжений элементов технологической системы, вибраций и остаточных напряжений.



Рис. 1.6.2. Схема причинно-следственных связей формирования геометрических погрешностей

Упругие перемещения технологической системы представляют собой перемещения и повороты ее деталей, обусловленные собственно упругими перемещениями деталей, контактными деформациями и выбором зазоров между деталями.

Упругие перемещения являются функцией действующих сил, их моментов и жесткости технологической системы, препятствующей их возникновению.

Процесс образования упругих перемещений протекает примерно следующим образом. На рис. 1.6.3, а показано, как точка *A* детали *I* под действием силы *P* перемещается относительно детали *II*.

Для упрощения рассмотрим перемещения точки *A* под действием момента силы *P*, приложенной в этой точке, направленной параллельно плоскости, пересекающей чертеж по оси *y*. Когда приложенная к детали *I* сила достигнет величины P_1 (рис. 1.6.3, б), достаточной, чтобы преодолеть силы трения в стыке, деталь *I* начнет перемещаться относительно детали *II*. Перемещение будет происходить до тех пор, пока деталь *I* не придет в соприкосновение с деталью *II* по небольшой поверхности контакта. За это время при относительно небольшом увеличении *P* точка *A* переместится на значительную величину y_1 . На графике сила – перемещение (рис. 1.6.3, ж) появляется пологий участок медленно поднимающейся кривой.

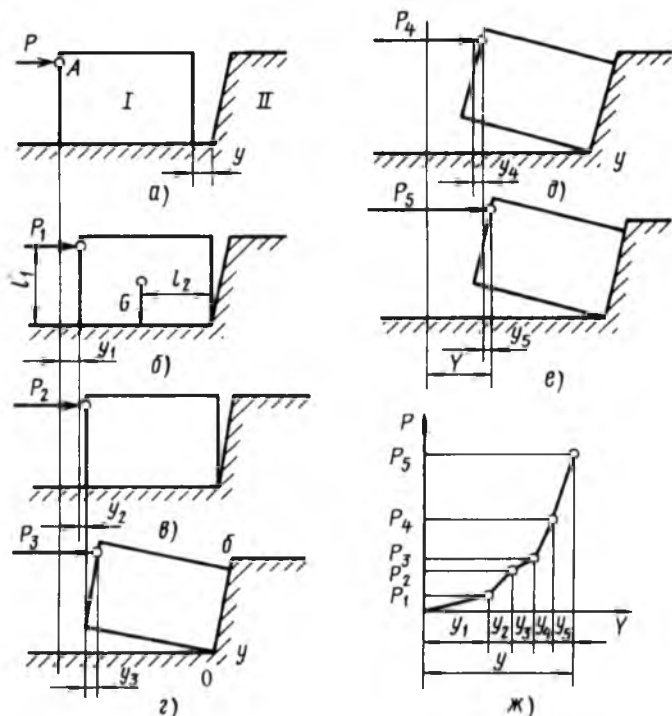


Рис. 1.6.3. Схема образования кривой зависимости упругих перемещений под действием силового фактора

В следующий промежуток времени при увеличении силы P на сопряженных участках поверхностей детали I и II начнет происходить контактная деформация (рис. 1.6.3, е), в результате перемещение точки A будет происходить медленнее, чем увеличение силы P . На графике появится криволинейный участок кривой. Дальнейшее увеличение силы P приводит к статическому равновесию, так как моменты, создаваемые силой P и силой тяжести детали G , равны:

$$Pl_1 = Gl_2.$$

По мере дальнейшего возрастания силы P , а следовательно, и момента Pl , деталь начнет поворачиваться вокруг оси (рис. 1.6.3, з), перпендикулярной к плоскости чертежа; на графике (рис. 1.6.3, ж) появится

криволинейный участок. Точка A переместится за это время на величину y_3 . Когда поворачивающаяся при возрастании силы P деталь I придет в соприкосновение с поверхностью $b - b$ детали II , начнется контактная деформация. Точка A переместится дополнительно на величину y_4 (рис. 1.6.3, δ); на графике (рис. 1.6.3, $ж$) появится новый криволинейный участок.

Дальнейшее увеличение силы P вызовет собственную деформацию деталей. Точка A детали I получит добавочное перемещение на величину y_5 (рис. 1.6.3, $е$); на графике (рис. 1.6.3, $ж$) появится круто поднимающийся участок кривой. Изложенное схематически показано на графике *сила – перемещение* (рис. 1.6.3, $ж$), где изображена вогнутая нагрузочная часть кривой. В общем случае возможны как криволинейные, так и прямолинейные участки кривой перемещений.

Задача усложняется, если от двух деталей перейти к узлу, в котором детали (относительное перемещение двух точек которых требуется определить) соединяются рядом других деталей. Например, шпиндель соединяется с корпусом коробки скоростей при помощи подшипников и втулок. В таких случаях описанные явления могут происходить в различной последовательности между каждым из двух сопрягаемых деталей, поэтому кривые на графиках *сила – перемещение* будут иметь различный вид.

Таким образом, относительные перемещения выбранных точек двух деталей узла представляют собой сумму перемещений, происходящих из-за наличия зазоров в стыках, контактных и собственных деформаций и поворотов деталей.

Итак, под действием внешних сил, приложенных к технологической системе; и сил, обусловленных рабочим и вспомогательными процессами, происходит выборка зазоров между деталями технологической системы, их контактные и собственные деформации; все эти явления возникают случайно. В результате детали технологической системы осуществляют малые перемещения и повороты, нарушая заданное относительное движение заготовки и инструмента.

При увеличении действующих сил в итоге выбора зазоров сопротивляемость деталей технологической системы растет и при равенстве активных сил и сил сопротивления возникает равновесное состояние; перемещения прекращаются.

Роль активных сил и их моментов играют силы и моменты рабочего и сопутствующих процессов; например, в станке действуют сила резания и сила зажима заготовки. Кроме того, действуют силы тяжести элементов технологической системы, силы инерции, трения, которые, как и любая другая сила, характеризуются величиной, направлением и положением точки их приложения.

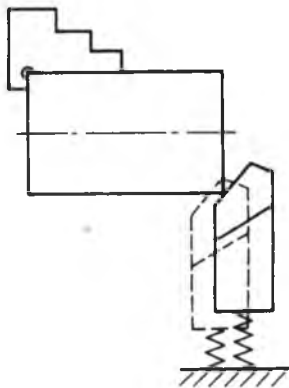


Рис. 1.6.4. Схема образования упругого перемещения при врезании резца в заготовку

Таким образом, технологическая система находится под воздействием силового поля.

Для съема слоя материала с детали в технологической системе необходимо создать натяг, с помощью которого обеспечивается равновесие сил резания, сопротивления, их моментов. Как только режущий инструмент (рис. 1.6.4) начинает врезаться в деталь, возникают силы резания, внутренние силы сопротивления материала, препятствующие удалению с него снимаемого слоя, и силы трения.

Под действием этих сил и их моментов происходят относительные перемещения деталей технологической системы.

Перемещения деталей технологической системы происходят до тех пор, пока натяг (упругое перемещение y) в технологической системе не обеспечит равенство возмущающих сил и сил сопротивления. Иными словами, технологическая система представляется как бы в виде пружины, которая при врезании инструмента в деталь под действием внешних сил сжимается. Когда сила сжатия пружины станет равной силе сопротивления, начинается съем материала с заготовки. Величина сжатия пружины характеризует упругое перемещение (натяг) технологической системы. Чем больше силы сопротивления, препятствующие съему материала с детали, тем больше должна быть сила резания при прочих равных условиях. Поскольку не существует технологических систем с абсолютной жесткостью, то в процессе резания всегда будет натяг и, следовательно, глубина резания всегда будет отличаться от величины припуска на величину натяга, что и приводит к возникновению погрешности обработки.

Силовое поле, под воздействием которого находятся детали технологической системы, как правило неравномерно. В процессе эксплуатации технологической системы изменяется одновременно состав действующих сил, их значения, направления и положение точек приложения. Например, если рабочие органы движутся, то силы, обусловленные рабочим процессом, будут менять свое положение относительно заготовки.

Воздействию силового поля на упругие перемещения препятствует жесткость технологической системы. Впервые вопросы жесткости были подробно изучены применительно к металлорежущим станкам.

Под жесткостью j , Н/мм, сборочной единицы понимают отношение приращения нагрузки к получаемому приращению упругих перемещений:

$$j = \Delta P / \Delta y \text{ [Н/мм]}.$$

Исследования показали, что в результате наличия зазоров в стыках, сложного неравномерного характера нагружения, особенностей конструкции, наличия геометрических погрешностей деталей жесткость технологической системы изменяется от одного цикла нагружения к другому. Это различие можно графически изобразить в виде петли гистерезиса. При одном и том же характере нагружения эта разница уже при третьем цикле нагружения сводится к минимуму (рис. 1.6.5).

Жесткость технологической системы или ее сборочной единицы зависит от их конструктивных особенностей, материала деталей, вязкости смазочного материала и его объема, погрешностей формы поверхностей стыков, степени нагрева и др. Оценивая степень влияния зазоров в стыках, собственной жесткости и контактной жесткости на упругие перемещения, можно отметить, что контактные упругие перемещения в общем балансе достигают 40...80 %.

Жесткость всегда является положительной величиной. Отрицательной жесткости не может быть, так как это противоречит физическому смыслу явления. При обработке заготовок наблюдается явление, когда с увеличением силы резания образуемый размер начинает уменьшаться. Это объясняется не наличием отрицательной жесткости, а направлением возникшего суммарного момента от всех действующих сил, вызвавшего относительное перемещение инструмента и заготовки.

В качестве примера на рис. 1.6.6 показана схема обработки заготовки на токарном станке резцом с $\varphi = 90^\circ$. В этом случае составляющая P_x будет значительно больше составляющей P_y силы резания.

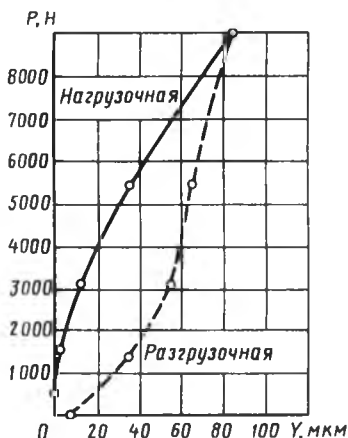


Рис. 1.6.5. График $Y = f(P)$ "нагрузки-разгрузки"

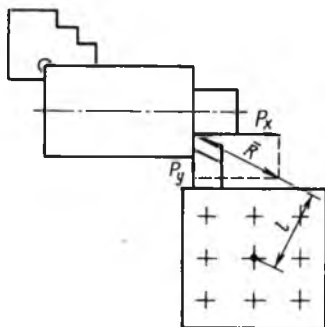


Рис. 1.6.6. Схема образования погрешности диаметрального размера

При существующей конструкции токарного станка направление равнодействующей $\vec{R}$ сил P_x и P_y пройдет правее точки O поворота суппортной группы станка. В результате под действием силы $\vec{R}$ на плече l резец врежется в заготовку и тем самым уменьшит диаметральный размер обработанной поверхности. И чем больше сила резания, тем больше врезание и меньше диаметральный размер.

Жесткость технологической системы во времени изменяется. Ее значения в статическом состоянии и во время работы могут существенно различаться. Например, существенное влияние на изменение жесткости оказывает нагрев тех-

нологической системы, а также вибрации.

Средний уровень жесткости составляет примерно 20000 Н/мм (соответствует тому, что при силе резания ~ 2000 Н упругое перемещение составит 0,1 мм).

Величина, обратная жесткости, получила название податливости W [мм/Н], которая характеризует способность сборочной единицы изменять относительное положение выбранных точек двух ее деталей в направлении действующей результирующей силы, т.е.

$$W = 1/j.$$

И жесткость, и податливость являются качественными характеристиками технологической системы, определяющими ее физическое состояние. Их следует определять при строгой регламентации всех факторов, оказывающих на них влияние.

Тепловые перемещения технологической системы происходят в результате нагрева технологической системы. Тепловые деформации ее элементов порождают их перемещения и повороты, характер которых подобен упругим перемещениям. Элементы системы, нагреваясь, расширяются, в результате "выбираются" зазоры между элементами. Выбор зазоров происходит случайно, поэтому и контакты деталей возникают в

случайных местах. Контактное взаимодействие порождает силы, моменты и, как следствие, повороты и перемещения деталей, а также контактные и собственные деформации деталей.

Тепловые перемещения являются функцией выделяемой теплоты и теплостойкости технологической системы, т.е. способности ее сопротивляться тепловым перемещениям. Основными источниками теплоты являются рабочий процесс, работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, возникающих при соприкосновении движущихся деталей в механизмах, электродвигателях, гидроприводах. Другим источником теплоты является окружающая среда (нагретый воздух, лучи солнца, нагревательные устройства).

Во время работы элементы технологической системы нагреваются неодинаково вследствие различного расположения источников тепла, их интенсивности и длительности выделения теплоты. В итоге тепловое поле технологической системы отличается по температуре в разных ее точках (рис. 1.6.7).

Неравномерность нагрева порождает различные тепловые деформации элементов системы. Элементы системы не имеют термоизоляции, поэтому происходит непрерывный перенос теплоты от более нагретой части технологической системы к менее нагретой. Этому также способствуют и наличие различных трубопроводов, по которым перемещается рабочая среда определенной температуры.

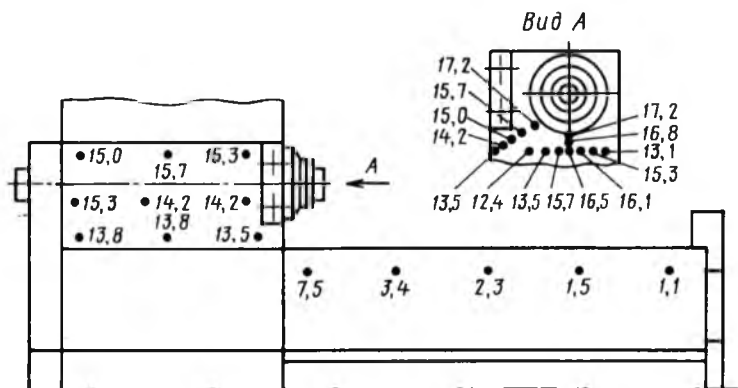


Рис. 1.6.7. Температурное поле станка
(цифры показывают перепады температур в °C)

Таким образом, непрерывно меняющееся тепловое поле системы служит дополнительным фактором, усложняющим процесс образования тепловых перемещений. В результате процесса выравнивания температурного поля технологической системы через определенный промежуток времени при прочих равных условиях в системе возникает равновесное тепловое состояние с установившейся температурой.

Вибрации элементов технологической системы – это движение точки или механической системы, при котором происходит поочередное возрастание и убывание во времени значений, по крайней мере, одной координаты. Вибрация нарушает заданное относительное положение или движение рабочих органов технологической системы и тем самым порождает геометрические погрешности.

Механизм образования перемещений элементов технологической системы, обусловленных вибрацией, отличается от механизма образования упругих перемещений тем, что после прекращения действия возбуждающих факторов упругие перемещения прекращаются, а вибрация может сохраняться длительное время. Различают свободные, вынужденные колебания и автоколебания.

Свободные колебания – это колебания (вибрация) системы, происходящие без переменного внешнего воздействия и поступления энергии извне. Условиями существования таких колебаний являются накапливание телом при своем движении кинетической и потенциальной энергий при отклонении тела от состояния равновесия.

Причинами, вызывающими свободные колебания, являются быстрое снятие статической нагрузки, удар, толчок, включение и выключение двигателя, изменение скорости движущихся элементов технологической системы, изменение режима работы технологической системы и т.п.; со временем эти колебания затухают, что объясняется наличием трения. Этот эффект называют *демпфированием*.

Механические системы ведут себя так, как если бы они стремились непрерывно совершать свободные колебания, но наличие трения не позволяет этого. Свободные колебания определяются тремя основными характеристиками системы: массой, жесткостью и демпфированием. Перечисленные характеристики изменяются под действием различных причин.

Изменение массы или жесткости представляет собой изменение наиболее важных характеристик колебательной системы. Увеличение массы системы приводит к снижению всех ее собственных частот, а увеличение жесткости – к возрастанию. Если конструкция элемента техно-

логической системы недостаточно жесткая, то элемент будет накапливать энергию вследствие собственных деформаций. Все колебания, связанные с собственными деформациями элементов технологической системы, имеют высокие собственные частоты.

Обычно свободные колебания в результате демпфирования сравнительно быстро затухают. Информация о колебаниях этого типа очень важна, так как по ней узнают о динамических свойствах колебательной системы через частоты, формы, коэффициент демпфирования, что позволяет предсказывать поведение механической системы (например, располагая достаточной информацией относительно распределения масс и жесткостей системы, можно рассчитать собственные частоты этой системы). Наибольшее влияние на погрешности обработки оказывают низкие частоты колебаний в технологической системе. При изменении состояния механической системы будет изменяться и процесс накопления энергии (например, если увеличивать температуру технологической системы, то изменяются собственные частоты и форма колебаний).

Вынужденные колебания – это колебания (вибрация) системы, вызванные и поддерживаемые силовым и кинематическим возбуждением. Для вынужденных колебаний характерно совпадение частоты изменения возбуждающей силы с частотой колебательного процесса.

Если частота возбуждающей силы близка к собственной частоте механической системы, то следует ожидать интенсивных колебаний, связанных с резонансом.

Причинами, порождающими вынужденные колебания, являются неуравновешенность вращающихся деталей, периодические силовые возбуждения, обусловленные характером рабочего процесса (периодически повторяющимися усилиями запрессовки при сборке, обработкой на станке заготовки с прерывистой поверхностью и т.п.), кинематическое возбуждение, когда база колеблющегося элемента машины совершает колебательные движения.

Возбуждение может быть в общем случае периодически повторяющимся, но не обязательно синусоидальным. Однако периодическая несинусоидальная функция может быть представлена в виде суммы синусоид, каждая из которых имеет свою амплитуду и частоту. Отсюда следует, что периодическое возбуждение можно рассматривать как возбуждение от нескольких сил, изменяющихся по синусоиде и действующих одновременно.

С приближением частоты вынужденных колебаний к собственной частоте возникает явление резонанса. Для вращающихся неуравновешен-

ных деталей существуют критические скорости, при которых частота вращения совпадает с частотой собственных колебаний детали (первая критическая скорость совпадает с первой собственной частотой, вторая критическая скорость совпадает со второй собственной частотой и т.д.).

Автоколебания – это колебания, возникающие в результате самовозбуждения.

Можно выделить следующие основные особенности, характеризующие автоколебания:

- возмущение не носит характера колебаний, оно имеет вид постоянного силового воздействия;

- реальная механическая система, подверженная действию сил трения или иного сопротивления, совершает незатухающие колебания;

- возникающие колебания не являются гармоническими;

- необходим постоянный приток энергии.

Стабилизация амплитуды автоколебаний говорит о том, что влияние факторов, порождающих самовозбуждение колебаний, снижается, в итоге исчезает и наступает равновесное состояние, характеризующееся равенством энергии, потребляемой и рассеиваемой системой за один цикл колебаний.

Динамические характеристики механической системы (собственные частоты, форма колебаний, коэффициент демпфирования) определяют способность системы так регулировать отбор энергии от источника, чтобы в системе возникли автоколебания. Нередко автоколебания сложны и непонятны, трудно поддаются объяснению в результате отсутствия периодического возмущения. Каждое явление автоколебаний связано с тем или иным физическим процессом, природа которого не лежит на поверхности.

Механизм, который превращает эту энергию в энергию колебаний, может быть найден только в результате глубокого изучения физики протекающего явления, изучения причин неустойчивости системы.

Возникновение в механической системе колебаний нельзя рассматривать без учета взаимодействия ее элементов. Возникшие колебания одной детали в технологической системе будут передаваться на другие, претерпевая определенную трансформацию. В основу описания колебательного процесса в механической системе (на примере станка) была положена аналогия между процессами, протекающими в системах автоматического регулирования и в станке. Упругую систему, процесс резания и процесс трения рассматривают как элементы замкнутой системы регулирования. Такое представление позволило сделать большой шаг вперед в изучении и описании колебаний механической системы.

Дальнейшее исследование этого вопроса должно идти по пути изучения глубинных причин возникновения колебаний, изучения физической картины зарождения, передачи и трансформации колебаний от одного элемента технологической системы к другому. При этом механическая система должна рассматриваться как совокупность многочисленных элементов со своими массами и жесткостями, обладающими возможностью относительных перемещений.

Одним из существенных факторов, порождающих вибрации, является неустойчивость равновесия деталей, обусловленная неопределенностью их базирования в технологической системе. Это объясняется тем, что часто конструктивные решения технологической системы обуславливают возможность деталей изменять свое относительное положение по мере изменения силового поля, образованного многочисленными силами, действующими в технологической системе. Например, по мере изменения направления тех или иных сил, действующих в технологической системе, может наблюдаться раскрытие стыков между деталями. Таким образом, деталь, до приложения силы лишенная шести степеней свободы, получая одну или несколько степеней свободы, преобразуется в консоль, для которой достаточно малейшего толчка, чтобы возбудить ее колебания. Однако движения этих деталей ограничены, как правило, смежными с ними деталями. Входя в контакт с этими деталями, колеблющаяся деталь передает им колебания, а последние, вследствие наличия собственных масс, жесткостей и коэффициентов демпфирования, приобретают иной характер. Одновременно смежные детали оказывают влияние на колебания первой детали, ограничивая амплитуду и изменяя частоту ее колебаний.

Изучение сложного процесса взаимодействия элементов технологической системы позволит глубже проникнуть в первопричины возникновения колебаний и на этой основе усовершенствовать расчетные методы.

Изнашивание элементов технологической системы обусловлено в первую очередь силовым и тепловым воздействием. Изнашивание сопровождается постепенным изменением их размеров и формы, что нарушает размерные связи в технологической системе и порождает погрешности относительного положения и движения исполнительных поверхностей. Исследование изнашивания деталей является самостоятельной областью знания, поэтому коротко остановимся на разновидностях изнашивания и его образования.

К основным видам изнашивания относятся:

— механическое, возникающее в результате механических воздействий;

- молекулярно-механическое, происходящее в результате одновременного механического воздействия и молекулярных или атомных сил;
- коррозионно-механическое, обусловленное трением материала, вступившего в химическое воздействие со средой.

В свою очередь механическое изнашивание включает абразивное, гидроабразивное (газоабразивное), эрозионное, усталостное и кавитационное изнашивания; коррозионно-механическое изнашивание включает окислительное изнашивание и изнашивание при фреттинг-коррозии (когда соприкасаются тела при малых колебательных перемещениях).

Величина износа и его скорость зависят от многих причин, таких как род и характер трения, удельное давление, степень нагрева и условий, в которых протекает изнашивание. К последним относятся форма и размеры трущихся поверхностей, качество поверхностей, материал, наличие и качество смазывающего материала, присутствие абразива и др.

Различают трение покоя и движения. Трение движения подразделяется на трение качения, скольжения и качения с проскальзыванием. По наличию смазочного материала различают трение без смазочного материала и со смазочным материалом. При граничной смазке трение и износ между поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются свойствами поверхностей и свойствами смазочного материала, отличными от объемных. В зависимости от конкретных условий при трении возникают механические, химические, теплофизические процессы. Преобладание какого-либо из них определяет вид и скорость изнашивания.

Остаточные напряжения в деталях. Остаточными называют такие внутренние напряжения, которые остаются в деталях после снятия нагрузок или воздействия внешних факторов. Внутренние напряжения образуются во всем объеме металла детали или в небольшой его части.

Обычно внутренние напряжения взаимоуравновешиваются и внешне ничем не проявляются до тех пор, пока это равновесие не будет нарушено. Нарушение равновесия приводит к перераспределению внутренних напряжений и, как следствие, к деформации детали.

С нарушением этого равновесия, вызываемого удалением части материала в виде припуска, обработкой без снятия стружки, термическим или химическим воздействием, деталь начинает деформироваться до тех пор, пока перераспределение напряжений не приведет к новому равновесному состоянию.

Различают: *напряжения I рода* – макронапряжения, охватывающие области, соизмеримые с размерами детали; *напряжения II рода* – микронапряжения, распространяющиеся на отдельные зерна или группу зерен металла; *напряжения III рода* – субмикроскопические, связанные с искажениями атомной решетки кристалла.

Непосредственной причиной образования остаточных напряжений является неоднородность изменений в смежных макро- и микроскопических объемах металла.

По причине образования остаточные напряжения делятся на две группы: конструкционные и технологические. Конструкционные вызываются в деталях процессами, происходящими в конструкции; вторые возникают в детали в процессе ее изготовления. Технологические напряжения возникают в результате неоднородных объемных изменений вследствие причин: неоднородного (неравномерного) нагрева или охлаждения; фазовых или структурных превращений металла, а также происходящих в нем диффузионных процессов; пластической деформации при наклепе. Одновременное действие двух или трех факторов приводит к весьма сложным эпюрам распределения остаточных напряжений по сечениям детали; их взаимодействие нередко приводит к образованию столь больших напряжений растяжения в поверхностных слоях детали, что возможно появление трещин и даже разрушение детали.

Например, при получении заготовки литьем наличие неодинаковых по толщине стенок у заготовки приводит к возникновению остаточных напряжений при охлаждении заготовки. По мере остывания меняется состояние металла, переходя из пластического состояния в упругое. По мере остывания заготовки наступает момент, когда металл в толстой стенке еще находится в пластическом состоянии, а в тонкой стенке – уже в упругом состоянии, поэтому и возникают в ней остаточные напряжения. В дальнейшем, по мере перехода металла толстой стенки в упругое состояние, эти напряжения усиливаются.

Рассмотрим процесс возникновения остаточных напряжений в отливке, имеющей одну тонкую и одну толстую стенки (рис. 1.6.8).

Если бы стенки отливки были разделены и остывали отдельно, то падение их температур и величина усадок соответствовали бы (см. рис. 1.6.8, б): для тонкой стенки I – кривой I , для толстой стенки II – кривой 2 . Однако, так как стенки связаны одна с другой, усадка отливки идет по какой-то средней кривой $BAВ$.

Процесс остывания отливки можно разделить на три этапа. Первый этап протекает от начала остывания до момента времени τ_1 , когда материал обеих стенок отливки находится в пластическом состоянии. При этом тонкая стенка будет растянута, толстая сжата. Вследствие этого в отливке произойдут пластические деформации, не порождающие, однако, внутренних напряжений, так как металл находится в пластическом состоянии.

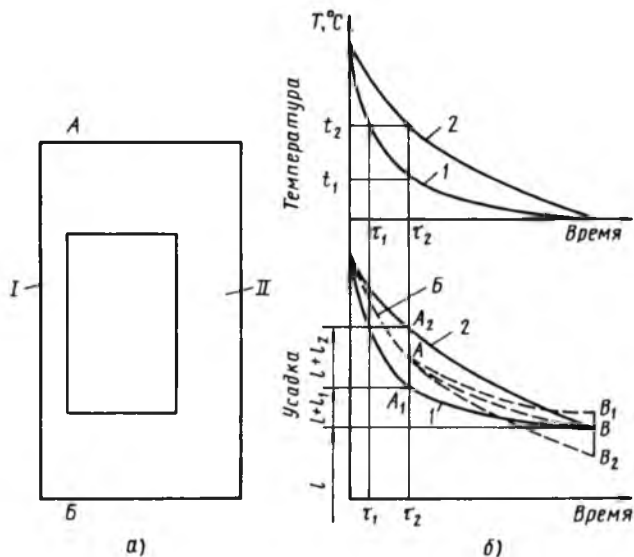


Рис. 1.6.8. Зависимости остывания стенок детали:
 а – эскиз детали; б – график изменения усадки отливки
 по мере изменения температуры

Второй этап составляет промежуток времени от τ_1 до τ_2 , в течение которого тонкая стенка достигает температуры порядка 620°C , при которой металл тонкой стенки перешел в упругое состояние, в то время как металл толстой стенки остается еще в пластическом состоянии. За этот промежуток времени кривая $БА$ действительной усадки отливки становится эквидистантной кривой 1 . Так как металл толстой стенки находится в пластическом состоянии, в тонкой стенке (а следовательно и во всей отливке) никаких упругих деформаций не появляется, т.е. не возникает и внутренних напряжений.

Третий этап начинается с момента времени τ_2 , когда металл толстой стенки переходит преимущественно в упругое состояние. Если бы в этот момент обе стенки отливки разделить, то при дальнейшем охлаждении их усадка протекала бы соответственно по кривой AB_1 – эквидистантной кривой 1 свободной усадки тонкой стенки, и по кривой AB_2 – эквидистантной кривой 2 свободной усадки толстой стенки. При этом каждая из стенок сохранила бы полученную пластическую деформацию и была бы свободна от внутренних напряжений.

Однако так как стенки соединены и отливка представляет собой жесткую конструкцию, ее усадка будет происходить по средней кривой *БАВ*. Так как металл в обеих стенках перешел в упругое состояние, в них возникнут упругие деформации, обратные по знаку, но равные по величине пластическим деформациям, так как $BB_1 = AA_1$ и $BB_2 = AA_2$. При этом в тонкой стенке возникают внутренние напряжения сжатия, а в толстой – напряжения растяжения. Напряжения возрастают с увеличением модуля упругости материала, поэтому внутренние напряжения в стальных отливках в 2 раза меньше, чем в чугунных.

Наибольшие остаточные напряжения образуются в деталях сложных конструктивных форм с резкими переходами от местных скоплений металла к тонким стенкам и ребрам. Примерами таких деталей могут служить станины, рамы, корпусные детали, лапа долота и др.

В сварных деталях также создаются остаточные напряжения вследствие их неравномерного нагрева и остывания при сварке. Конструкция сварных деталей, как правило, имеет меньшую жесткость, чем литых, поэтому в ней остаточные напряжения больше. Возникают остаточные напряжения и в заготовках, полученных из проката, также вследствие неравномерного остывания, обусловленного различным скоплением металла.

В процессе обработки заготовок, имеющих остаточные напряжения, при снятии с них слоя материала напряжения, а следовательно, и деформации заготовок значительно возрастают. Если при этом учесть, что заготовка зажата в приспособлении и напряжения не перераспределяются, то деформации после раскрепления заготовки станут еще больше.

В процессе изготовления деталей большой длины и малой жесткости часто применяют операцию холодной правки заготовки. При холодной правке возникают остаточные деформации в детали, направление которых противоположно направлению деформаций, имеющихся до правки, и равные им по величине. При нагружении балки поперечной силой P (рис. 1.6.9) на участке *АВ* возникают упругие деформации, подчиняющиеся закону Гука, а на участках *АГ* и *БВ* – пластические деформации. После снятия нагрузки деталь начинает упруго деформироваться в противоположном направлении под действием упругих напряжений, оставшихся в ее средней части. После наступления равновесия напряжений упругие деформации детали прекращаются; в результате на последующую обработку деталь поступает в напряженном состоянии и при снятии с нее слоя материала равновесие нарушается и она деформируется.

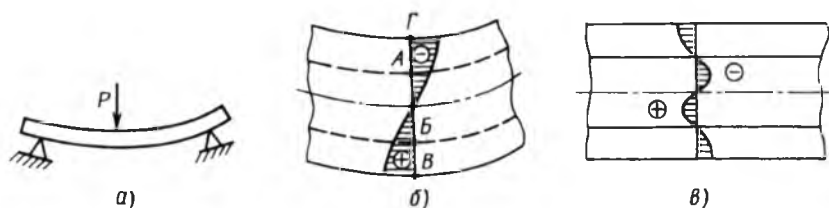


Рис. 1.6.9. Схема распределения напряжений при холодной правке:
а – схема нагружения; *б, в* – эпюра напряжений при нагрузке *P* и после снятия нагрузки соответственно

Остаточные напряжения в поверхностных слоях металла возникают при наклепе деталей после операций волочения, прошивки, развальцовки, калибровки и другой обработки методом холодного давления. Под влиянием суточных и сезонных температурных колебаний остаточные напряжения и деформации деталей постепенно перераспределяются. При этом перераспределение остаточных напряжений и деформаций вначале протекает интенсивно, а затем постепенно замедляется.

Практически установлено, что детали машин после их обработки продолжают деформироваться при работе в машинах за счет продолжающегося перераспределения остаточных напряжений.

1.6.2. ОБРАЗОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДЕТАЛИ

Рассмотрим, как действие вышеизложенных факторов порождают геометрические погрешности детали.

Их влияние на геометрические погрешности детали происходит через изменение закона относительного движения заготовки и обрабатывающего инструмента, что приводит в каждый момент времени к отклонению относительного положения заготовки и инструмента.

Рассмотреть все возможные варианты механизма образования геометрических погрешностей обработки не представляется возможным в силу огромного разнообразия конструкций технологической системы, схем базирования, условий обработки и др. Поэтому задача сводится к тому, чтобы изложить методический подход к установлению механизма образования погрешностей обработки.

1.6.2.1. Влияние упругих перемещений на точность изготовления детали

Упругое перемещение является функцией силы и жесткости. К силам, порождающим упругие перемещения технологической системы, относится сила резания, сила зажима, центробежная сила и др.

Жесткость технологической системы определяется жесткостью j_3 части технологической системы, с которой связана заготовка, жесткостью самой заготовки j_d и жесткостью j_n части технологической системы, с которой связан обрабатывающий инструмент.

В свою очередь жесткости частей технологической системы зависят во многом от схемы базирования заготовки и инструмента, а жесткость заготовки – от ее конструкции.

Таким образом, в общем случае можно записать, что относительное упругое перемещение заготовки и инструмента

$$y = y_3 + y_d + y_n, \quad (1.6.1)$$

где y – упругое относительное перемещение заготовки и инструмента; y_3 – упругое перемещение заготовки относительно станины станка; y_d – собственные упругие деформации заготовки; y_n – упругое перемещение инструмента относительно станины станка.

Представим каждое слагаемое уравнения (1.6.1) как отношение силы к жесткости, тогда

$$y = \frac{P}{j_3} + \frac{P}{j_d} + \frac{P}{j_n}, \quad (1.6.2)$$

где j_3 , j_d , j_n – жесткость соответственно группы деталей от заготовки до станины, заготовки и группы деталей от инструмента до станины.

Рассмотрим образование каждого из слагаемых формулы (1.6.2) и их влияние на геометрические погрешности детали.

Влияние сил на погрешность обработки. Рассмотрим влияние действующих сил на примере изготовления вала при его базировании на токарном станке в центрах с односторонним поводком (рис. 1.6.10).

Эта схема базирования широко применяется не только на токарных, но и на шлифовальных, зубообрабатывающих и других станках.

При такой схеме базирования действует сила резания $\bar{P}$, сила P_n , возникающая при передаче крутящего момента от планшайбы к заготовке, и центробежная сила $P_{ц}$.

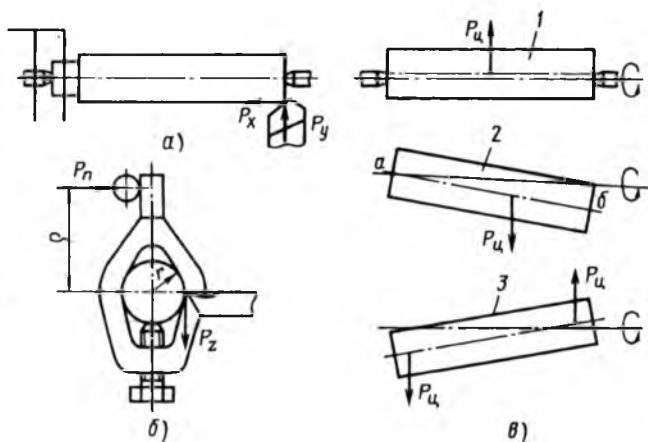


Рис. 1.6.10. Схемы сил, действующих при обработке вала на токарном станке:

а – составляющие силы резания; *б* – сила, передаваемая поводком;
в – центробежные силы

Представим силу резания как сумму трех ее составляющих

$$P_z = C_{pz} t^{xz} S^{yz} v^{nz} K_z;$$

$$P_y = C_{py} t^{xy} S^{yy} v^{ny} K_y;$$

$$P_x = C_{px} t^{xx} S^{yx} v^{nx} K_x,$$

где C_{pz} , C_{py} , C_{px} – коэффициенты, характеризующие свойства обрабатываемого материала и материала режущего инструмента; t – глубина резания; S – подача; v – скорость резания; K_x , K_y , K_z – коэффициенты, характеризующие условия обработки; xz , xy , xx , yz и др. – показатели степени.

Силу, передаваемую поводком, определяют из схемы (рис. 1.6.10, б):

$$P_n = P_z \frac{r}{\rho},$$

где ρ , r – плечи действия сил соответственно P_n , P_z .

Центробежная сила обусловлена неуравновешенной массой и положением заготовки относительно оси вращения шпинделя. Существуют

три характерные схемы расположения неуравновешенных масс заготовки (см. рис. 1.6.10, в) относительно оси вращения шпинделя: 1, 2 – статическая неуравновешенность (различаются характером распределения неуравновешенной массы и положением точки приложения силы $P_{\text{ц}}$); 3 – динамическая неуравновешенность (действует момент центробежных сил). Следует иметь в виду, что по мере снятия неуравновешенной части материала значения силы $P_{\text{ц}}$ будут изменяться и будет смещаться точка ее приложения.

Раскроем составляющие уравнения (1.6.1) для принятой схемы базирования заготовки (рис. 1.6.11), представляющей собой гладкий вал:

$$y_3 = \left(1 - \frac{x_p}{L}\right)^2 \frac{P}{j_{\text{п.ц}}} + \left(\frac{x_p}{L}\right)^2 \frac{P}{j_{\text{з.ц}}}, \quad (1.6.3)$$

где L – длина заготовки; x_p – координата положения вершины резца на оси заготовки; $j_{\text{п.ц}}$ – жесткость переднего центра; $j_{\text{з.ц}}$ – жесткость задней центра.

Пусть $j_{\text{п.ц}} = j_{\text{з.ц}}$.

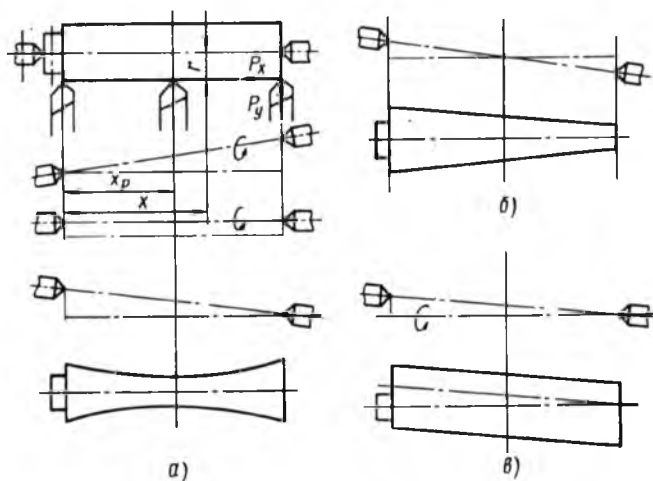


Рис. 1.6.11. Схема образования упругих перемещений переднего и заднего центров и погрешности вала при токарной обработке:

а, б, в – под действием сил P_y , P_x , P_n соответственно

Величина упругого прогиба y_d оси гладкого вала под резцом в сечении $x = L/2$ определяется с помощью уравнения

$$y_d = \frac{Px^2(L-x)^2x^2}{3EJL}, \quad (1.6.4)$$

где E – модуль упругости первого рода; J – момент инерции; x – координата сечения, в котором рассчитывается прогиб.

Упругое перемещение резца:

$$y_n = P/j_n.$$

Рассмотрим влияние каждой из действующих сил на упругие перемещения технологической системы и погрешность детали.

Сила P_y . Влияние P_y на y_3 происходит следующим образом. По мере перемещения резца от заднего центра к переднему центру под действием силы P_y происходят непрерывные упругие перемещения обоих центров, зависящие от положения резца на оси вала, в результате происходит поворот оси вала.

Когда резец находится у заднего центра, упругое перемещение последнего $y_{3.ц}$ будет максимальным, а упругое перемещение переднего центра $y_{п.ц}$ равно 0, когда резец находится у переднего центра: $y_{п.ц} = \max$, $y_{3.ц} = 0$.

По мере перемещения резца вдоль оси x от заднего центра к переднему центру поворот оси вала будет уменьшаться и в положении $x = L/2$ ось вала станет параллельна начальному положению, при условии $j_{п.ц} = j_{3.ц}$.

При дальнейшем движении резца ось вала начнет поворачиваться в другую сторону. Если построить огибающую кривую положений линии центров, то она будет иметь вид параболы в соответствии с уравнением (1.6.3).

В результате под действием силы P_y на детали от слагаемого y_1 уравнения (1.6.3) появится погрешность формы детали в продольном сечении в виде "корсетности" (см. рис. 1.6.11, а).

Влияние P_y на y_d , как следует из уравнения (1.6.4), вызовет прогиб вала.

По мере перемещения резца от заднего центра к переднему величина прогиба будет увеличиваться и при $x = L/2$ достигнет максимального значения, а затем прогиб начнет уменьшаться. Из-за прогиба вала будет уменьшаться снимаемый припуск и в результате на валу появится погрешность геометрической формы в продольном сечении в виде "бочкообразности" (рис. 1.6.12).

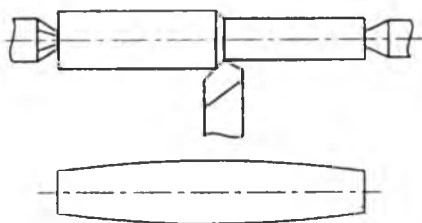


Рис. 1.6.12. Образование погрешности обработки от упругого прогиба вала

Влияние P_y на y_n можно рассчитать с помощью зависимости

$$y_n = P_y / j_n. \quad (1.6.5)$$

Поскольку величина y_n под действием силы P_y не зависит от положения резца по оси X , поэтому y_n вызовет постоянную по величине погрешность диаметрального размера, а направление этой погрешности зависит от положения центра поворота суппортной группы.

Сила P_x влияет на y_z следующим образом. Поскольку сила P_x параллельна оси X и действует на плече, равном радиусу детали, то образуется момент, направленный по часовой стрелке, величина которого не зависит от положения резца на оси X . Под действием этого момента возникают упругие перемещения центров, при этом перемещение переднего центра направлено от резца, а заднего центра – на резец (рис. 1.6.11, б); в результате ось вала оказывается повернутой. Это вызывает погрешность формы вала в продольном сечении в виде конусности (рис. 1.6.11, б), направленной в сторону заднего центра. На величину y_d сила P_x практически не влияет, так как направлена параллельно оси вала.

Влияние P_x на y_n определяется из (1.6.5). Величина y_n остается постоянной при любом положении резца на оси X , что приводит к погрешности диаметрального размера, направление которой зависит от положения центра поворота суппортной группы.

Сила P_z направлена по оси Z (рис. 1.6.10, б) и упругие перемещения, вызванные P_z , направлены перпендикулярно расстоянию между центром вала и вершиной резца. Вследствие этого величина относительного упругого перемещения заготовки и резца от силы P_z влияет на приращение радиуса детали величиной на порядок меньше и поэтому, как правило, этой погрешностью можно пренебречь.

Сила P_n . Из рис. 1.6.10, б видно, что P_n влияет только на y_x . Перенесем силу P_n в центр вала (см. рис. 1.6.10, б), тогда получим пару сил и силу P_n , приложенную в центре вала. Последняя вызовет упругое перемещение переднего центра, в результате произойдет поворот оси вала относительно заднего центра (рис. 1.6.11, в).

Поскольку сила P_n вращается вместе с валом, то будет иметь место вращение повернутой оси вала вокруг оси шпинделя. Это приведет к появлению эксцентриситета профиля вала относительно центровых отверстий, причем эксцентриситет будет уменьшаться по мере приближения к заднему центру (рис. 1.6.11, в).

Изменение величины упругого перемещения переднего центра относительно оси вращения под действием P_n по мере движения резца вдоль оси X :

$$y_{n.u} = \frac{P_n}{j_{n.u}} \frac{x}{L}. \quad (1.6.6)$$

Согласно (1.6.6), величина $y_{n.u}$ уменьшается по мере приближения к заднему центру. В результате ось обработанной поверхности вала окажется повернутой относительно линии центровых отверстий вала.

Центробежная сила $P_{ц}$. В рассматриваемом случае сила $P_{ц}$ оказывает непосредственное влияние только на y_z и y_d . Центробежная сила, так же как и сила P_n , смещает ось вала относительно оси вращения шпинделя, что приводит к образованию эксцентриситета обработанной поверхности относительно линии центровых отверстий вала (см. рис. 1.6.11, в). $P_{ц}$ обусловлена наличием неуравновешенной массы, которая зависит от геометрической формы заготовки и положения последней относительно оси вращения.

Характерные схемы заготовки с неуравновешенной массой относительно оси вращения шпинделя, вызывающие центробежные силы, приведены на рис. 1.6.10, в. В первых двух случаях имеет место статическая неуравновешенность, когда действует только $P_{ц}$. В третьем случае имеет место динамическая неуравновешенность, когда действуют две противоположно направленные силы $P_{ц}$, образующие момент. Вид неуравновешенности оказывает влияние на характер изменения эксцентриситета по оси X . Следует иметь в виду, что по мере снятия с заготовки неуравновешенной массы материала будут изменяться как сила $P_{ц}$, так и положение ее точки приложения.

В процессе обработки одновременно могут действовать все рассмотренные силы и при этом изменяться по величине, направлению и положению точек приложения. В итоге их совместного действия на детали получается суммарная погрешность обработки.

Влияние переменной жесткости технологической системы на погрешность обработки. На погрешность детали большое влияние оказывает переменная j , при этом устранять переменную j оказывается сложно,

так как часто она является результатом конструктивного решения технологической системы.

Переменная j по пути движения инструмента вызывает погрешность формы обработанной поверхности, в ряде случаев и погрешность положения этой поверхности относительно технологических баз детали. Рассмотрим несколько примеров влияния неравномерности жесткости на погрешность детали.

Влияние неравенства j переднего и заднего центров. Под действием силы P_y в результате разности жесткостей центров на детали возникает кроме "корсетности" конусность, направление которой определяется характером неравенства j центров.

При $j_{п.ц} > j_{з.ц}$ конусность будет направлена в сторону переднего центра, а при $j_{п.ц} < j_{з.ц}$ – в сторону заднего центра (рис. 1.6.13, а).

Под действием силы P_x при $j_{п.ц} > j_{з.ц}$ конусность будет больше по сравнению с конусностью от действия P_x при $j_{п.ц} = j_{з.ц}$, а при $j_{п.ц} < j_{з.ц}$ конусность будет меньше (рис. 1.6.13, б). Под действием P_z неравенство жесткости центров скажется на характере изменения эксцентриситета по оси X .

Изменение жесткости гладкого вала в результате съема с него припуска сказывается на погрешности формы в продольном сечении. Как только начинается съем припуска, вал превращается из гладкого в двухступенчатый (рис. 1.6.14) с непрерывно изменяющимся соотношением длин ступеней, и в конце прохода становится опять гладким.

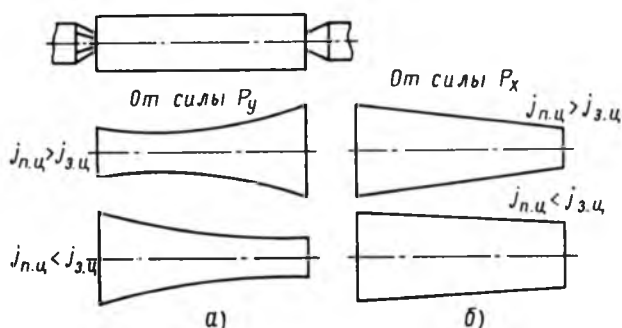


Рис. 1.6.13. Погрешность формы вала из-за неравенства жесткостей переднего и заднего центров:

а – под действием силы P_y ; б – под действием силы P_x

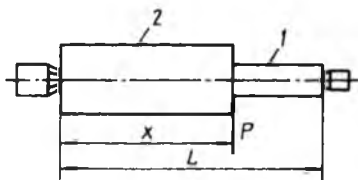


Рис. 1.6.14. Схема точения
гладкого вала:
1, 2 – ступени вала

Прогиб y_d гладкого вала под действием силы резания в сечении

$$y_d = \frac{Px_p^2(L-x_p)^2}{6EJL} \left[2\frac{x}{x_p} + \frac{x}{L-x_p} - \frac{x^3}{x_p^2(L-x_p)} \right], \quad (1.6.7)$$

где x – координата положения поперечного сечения, в котором определяется прогиб (см. рис. 1.6.11); x_p – координата точки приложения поперечной силы; L – длина детали; J – момент инерции; P – поперечная сила; E – модуль упругости второго рода.

Но эта зависимость справедлива, если не учитывать изменения диаметального размера вала вследствие съема припуска. С учетом этого обстоятельства прогиб вала в переходном сечении от одной ступени к другой будет определяться с помощью зависимости

$$y_d = \frac{Px^5}{3EJ_1L^2} + \frac{P}{EJ_2} \times \left[\left(\frac{L^3 - x^3}{3} \right) \left(1 - \frac{x^2}{L} \right) - 2 \left(\frac{L^2 - x^2}{2} \right) \left(x - \frac{x^2}{L} \right) + x(L-x) \right]. \quad (1.6.8)$$

Если $x = L/2$, то

$$y_d = \frac{PL^3}{96EJ_1} + \frac{PL^3}{96EJ_2}, \quad (1.6.9)$$

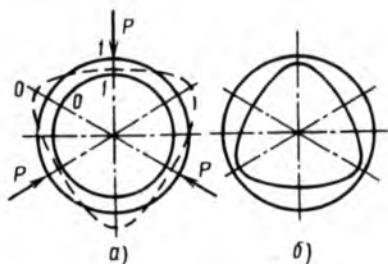
где J_1, J_2 – моменты инерции ступеней 1 и 2.

Влияние фактора переменной массы на точность обработки становится существенным, когда снимаемый припуск составляет не менее 20 % от диаметра при условии, что вал относится к группе нежестких валов, у которых $l/d > 15$.

Малая жесткость в угловом направлении у тонкостенных деталей типа кольца втулки вызывает погрешность формы в поперечном сечении.

Рис. 1.6.15. Искажение формы отверстия тонкостенного кольца в поперечном сечении:

a – искажение формы кольца в трехкулачковом патроне;
б – форма отверстия в кольце после обработки



На рис. 1.6.15 показано тонкостенное кольцо, установленное в трехкулачковом патроне. Под действием сил зажима P происходят упругие деформации кольца под кулачками (рис. 1.6.15, *a*). В результате при растачивании отверстия резец будет снимать неравномерный по величине припуск в зависимости от угла поворота. После снятия со станка кольцо примет первоначальную форму и в поперечном сечении отверстия появится погрешность формы (рис. 1.6.15, *б*).

Переменная жесткость обрабатывающего инструмента вызывает погрешность геометрической формы. Наиболее характерным примером является обработка консольным инструментом с изменяющимся вылетом. На рис. 1.6.16 показана схема обработки отверстия расточной оправкой, установленной на выдвижном шпинделе. По мере выдвижения шпинделя его вылет увеличивается, жесткость уменьшается, а упругое перемещение увеличивается. В результате обработанное отверстие получается с погрешностью формы в продольном сечении.

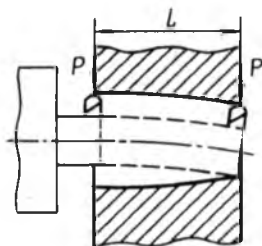


Рис. 1.6.16. Погрешность формы отверстия в продольном сечении при растачивании с выдвижным шпинделем

1.6.2.2. Влияние тепловых перемещений на точность изготовления детали

Тепловые перемещения являются функцией выделяемого тепла и теплоемкости технологической системы, т.е. ее способности сопротивляться возникновению тепловых перемещений.

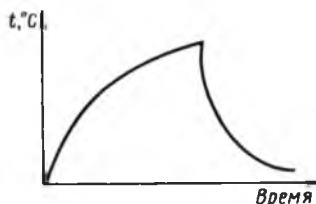


Рис. 1.6.17. Теоретическая зависимость нагрева и охлаждения

Многочисленные исследования тепловых перемещений показывают, что степень нагрева и тепловые перемещения во времени изменяются по экспоненциальному закону (рис. 1.6.17).

В силу различных условий эксплуатации технологическая система попеременно нагревается и охлаждается. К факторам, влияющим на тепловые перемещения, относится количество выделяемого тепла в единицу времени, продол-

жительность выделения тепла, перенос тепла от более нагретого к менее нагретому участку технологической системы.

Теплостойкость технологической системы определяется ее конструкцией, схемами базирования деталей, коэффициентами линейного расширения материала деталей, наличием зазоров в соединениях деталей, расположением источников тепла.

В результате нагрева технологической системы ее детали претерпевают тепловые деформации, что порождает их перемещения и повороты, сходные по своему характеру с упругими перемещениями. Однако тепловые перемещения отличаются от упругих перемещений высокой инерционностью. Если упругие перемещения после снятия нагрузки практически мгновенно прекращаются, то тепловые перемещения исчезают постепенно по мере охлаждения. Это оказывает существенное влияние на формирование точности детали.

Как правило, тепловое состояние технологической системы является нестационарным; в результате попеременно действующие источники тепла, неравномерности выделяемого тепла, перерывы в работе технологической системы и др., существенно усложняют картину тепловых перемещений.

Рассмотрим характер нагрева и тепловых перемещений элементов технологической системы и их влияние на точность детали.

Тепловые деформации станка. Нагрев станины, корпусных и других деталей станков происходит в результате потерь на трение в механизмах, гидроприводах и электроустройствах. Большое количество тепла передается этим деталям смазочно-охлаждающей жидкостью, отводящей тепло от зоны обработки, а также от встроенных электродвигателей. Тепло передается также из внешней среды, окружающей станок.

Нагрев станины перечисленными источниками тепла происходит в большинстве случаев неравномерно: одни части станины нагреваются сильнее других. Это обусловлено расположением в разных местах станка электродвигателей, электронасосов, резервуаров для масла и охлаждающей жидкости и других источников тепловыделения. Разность температур отдельных элементов станины может достигать 10°C и более. В этих условиях станина теряет правильную форму, в результате нарушается взаимное расположение на ней основных элементов станка. При разработке новых конструкций станков необходимо обращать внимание на способности их к выравниванию температурного поля станины и лучшее охлаждение.

Одним из источников образования тепла в станке является шпindelная бабка. Температура в различных точках корпуса бабки изменяется в пределах $10\ldots 50^{\circ}\text{C}$. Наиболее высокая температура наблюдается в местах расположения подшипников шпинделя и подшипников быстроходных валов. Температура валов и шпинделей на $30\ldots 40\%$ выше средней температуры корпусных деталей, в которых они смонтированы. При большой длине шпинделя необходимо считаться с его осевым удлинением от нагрева, что влияет на точность обработки.

Относительно сильный нагрев шпindelных бабок влечет за собой изменение положения оси шпинделя. Например, шпиндель передней бабки токарного станка может сместиться по вертикальной и в горизонтальной плоскостях на несколько сотых долей миллиметра.

Большое влияние на точность обработки оказывают тепловые деформации винтов подачи. Длина винта оказывает большое влияние на точность перемещений бабки шлифовальных станков. В неудачных конструкциях, где длина рабочего участка винта велика, погрешность может достигать $0,03\ldots 0,05$ мм.

Тепловые деформации заготовок. Кроме тепловых деформаций станка, на точность механической обработки влияют также тепловые деформации обрабатываемых заготовок, нагрев которых происходит в результате выделения тепла в процессе резания. Многочисленные исследования показали, что основное количество тепла аккумулируется в стружке, а в обрабатываемую заготовку переходит незначительное количество тепла. Это положение справедливо для таких методов обработки, как точение, фрезерование, строгание, наружное протягивание. Для таких методов обработки как сверление, распределение тепла другое – его большая часть остается в заготовке.

При токарной обработке в стружку уходит 50...86 % тепла (а при высоких скоростях резания – свыше 90 %); 10...40 % тепла переходит в резец; 3...9 % остается в заготовке и около 1 % рассеивается в окружающую среду.

Применение обильного охлаждения позволяет практически устранить нагрев заготовки. В этом случае ее тепловые деформации весьма незначительны и их влияние на точность обработки можно не учитывать. Обработка серого чугуна, бронзы и некоторых других материалов производится без охлаждения, поэтому тепловые деформации получаются значительными.

Влияние тепловых деформаций заготовки на точность детали происходит следующим образом. Нагреваясь в процессе обработки, заготовка вследствие расширения стремится удлиняться, однако свободному расширению заготовки препятствует ее закрепление. В итоге возникает искажение геометрической формы заготовки, что переносится на погрешность детали. На рис. 1.6.18 показана структура теплового поля при обработке заготовки.

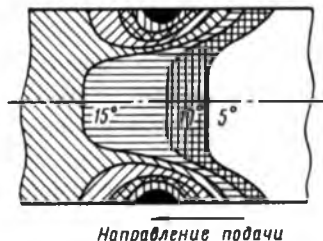


Рис. 1.6.18. Тепловое поле "цилиндрического" источника тепла, движущегося вдоль оси обрабатываемой заготовки

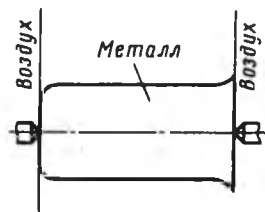


Рис. 1.6.19. Образование погрешности формы детали из-за тепловых деформаций

Погрешность формы детали возникает вследствие тепловых деформаций заготовки в процессе ее обработки в результате теплового поля "цилиндрического" источника тепла (резца), движущегося вдоль оси цилиндрической обрабатываемой детали. Замена "точечного" источника тепла, перемещающегося по винтовой линии, цилиндрическим, как показывают исследования, достаточно точно отражает происходящее явление.

Из рис. 1.6.19 видно, что впереди источника тепла в поверхностных слоях детали движется довольно значительная опережающая волна тепла. Когда источник тепла приближается к концу детали,

температура последнего значительно увеличивается (примерно в 2 раза по отношению к средним сечениям). Это явление вызвано тем, что на границе двух сред, из которых воздух обладает более низкой теплопроводностью, опережающая волна тепла теряет скорость и, следовательно, не может выйти в воздух с той же скоростью, с какой она перемещалась по обрабатываемой детали. В результате в этом месте заготовка расширилась больше и был снят больший припуск, что и вызвало искажение формы обработанной детали после обработки.

Удлинение вследствие нагрева обрабатываемой детали, установленной между неподвижными центрами станка, вызывает дополнительный прогиб и также приводит к образованию погрешностей формы.

Наибольшие тепловые деформации происходят при односторонней обработке длинных деталей типа станин станков, направляющих планок, реек.

Расчеты показывают, что тепловые деформации деталей соизмеримы в ряде случаев с допусками на их обработку. Например, тепловая деформация чугунной станины высотой 600 мм при длине 2000 мм доходит до 0,01 мм/м при разности температуры по высоте станины в 2,4 °С. Эта величина соразмерна с допуском на отклонение от прямолинейности станин точных станков.

Практика показывает, что тепловые деформации массивных заготовок малы и их влиянием на точность обработки можно пренебречь, особенно при незначительных размерах обрабатываемых поверхностей. Тепловые деформации тонкостенных заготовок с относительно большими обрабатываемыми поверхностями могут достичь величин, сопоставимых с допусками по 7-му качеству. Влияние тепловых деформаций на точность растет при обработке внутренних поверхностей, когда поглощение тепла заготовкой увеличивается.

Тепловые деформации инструмента. Несмотря на то, что при обработке резанием в инструмент переходит сравнительно небольшая доля образующегося тепла, он во многих случаях все же подвержен интенсивному нагреву. Например, на рабочей поверхности резцов из быстрорежущей стали наблюдается температура 700...850 °С. С удалением от зоны резания температура тела резца заметно снижается.

В начале резания наблюдается быстрое повышение температуры резца. Затем ее рост замедляется, и через непродолжительное время дос-

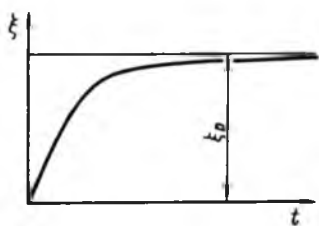


Рис. 1.6.20. График изменения теплового удлинения ξ резца

тигается состояние теплового равновесия. На рис. 1.6.20 дана характерная зависимость теплового удлинения ξ консольной части резца от времени резания (ξ_p — удлинение резца при его тепловом равновесии). При обычных условиях работы удлинение резца может достигать 30...50 мкм.

Нагрев, а следовательно, и удлинение резца растут с увеличением подачи, глубины и скорости резания;

удлинение резца возрастает также с повышением предела прочности (твердости по Бринеллю) обрабатываемого материала (рис. 1.6.21).

Приведем графики тепловых перемещений технологической системы. На рис. 1.6.22 показаны кривые 1–5, характеризующие изменения температуры, и кривые 6–8, характеризующие тепловые перемещения

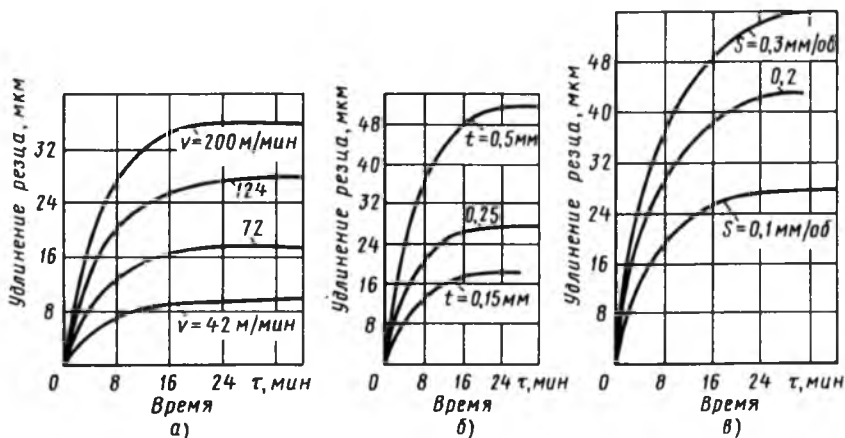


Рис. 1.6.21. Графики изменения теплового удлинения резца с пластиной Т15К6 во времени при непрерывной работе:
а — $t = 0,25$ мм; $S = 0,1$ мм/об; б — $v = 122$ м/мин; $S = 0,1$ мм/об;
в — $v = 120$ м/мин; $t = 0,5$ мм

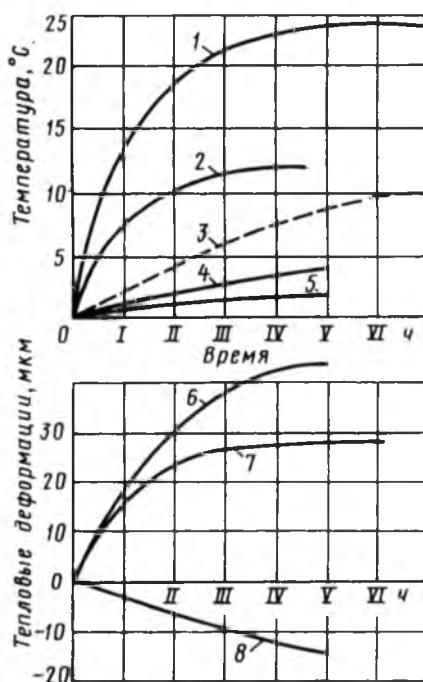


Рис. 1.6.22. Температурные изменения и тепловые перемещения элементов круглошлифовального станка:

- 1 – масло гидросистемы; 2 – корпус шлифовальной бабки; 3 – нагрев станины при максимальном расчетном режиме работы; 4 – станина;
 5 – охлаждающая жидкость; 6 – перемещение шлифовального круга;
 7 – изменение радиуса обрабатываемой детали; 8 – перемещение детали в результате тепловых деформаций станины

отдельных элементов, а также изменения радиуса обрабатываемых деталей. Из графиков 1 – 8 видно, что в ряде случаев тепловые перемещения возрастают быстрее температуры. Объясняется это тем, что повороты деталей станка, происходящие из-за неравномерного нагрева деталей, увеличивают перемещения связанных с ними других деталей пропорционально расстояниям точек, в которых измеряется перемещение относительно оси поворотов.

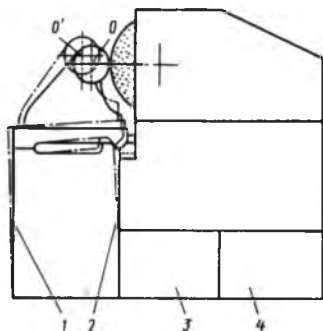


**Рис. 1.6.23. Эскиз
круглошлифовального станка**

Причиной неравномерного нагрева стенок 1, 2 (рис. 1.6.23) станины являются источники тепла в виде электронасосов подачи масла и охлаждающей жидкости, а также баки 3, 4, расположенные в правой части станины, и др.

1.6.2.3. Влияние изнашивания элементов технологической системы на точность изготовления детали

Тип технологической системы, рабочий процесс, условия работы оказывают влияние на характер изнашивания деталей технологической системы. В то же время во многих технологических системах содержатся типовые узлы, механизмы, соединения, выполняющие одни и те же функции и характеризующиеся одним и тем же видом изнашивания.

Наибольшая степень изнашивания наблюдается у деталей, с помощью которых выполняются рабочие функции технологической системы. Обычно рабочие процессы характеризуются большим силовым и тепловым воздействием. К таким деталям относятся, например, резец, пуансон, поршень и т.п.

У технологических систем наибольшему изнашиванию подвержены направляющие станины и обрабатывающий инструмент. В свою очередь у станин интенсивному изнашиванию подвергаются направляющие. Особенно это ярко проявляется в условиях крупносерийного и массового производства.

Например, при обработке роторов электродвигателей на токарном станке суппорт совершает многократные возвратно-поступательные движения в пределах одной и той же зоны направляющих станины. В результате в этой зоне уже через месяц наблюдается заметный износ направляющих, порождающий погрешность формы ротора в продольном сечении.

Износ инструмента в процессе обработки происходит вследствие действия целого ряда факторов (сил трения, колебания, сил резания, нагрева), а также свойств смазочно-охлаждающей жидкости, материала, инструмента и обрабатываемой детали. Следствием износа является затупление режущей части и изменение размера поверхности или расстояния поверхностей обрабатываемых деталей. Такой износ резца получил название *размерного*, в отличие от износа по задней поверхности резца, которым пользуются при исследованиях в области резания металлов.

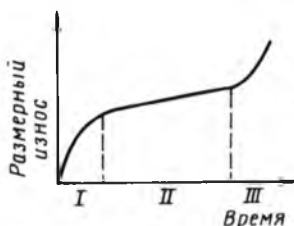


Рис. 1.6.24. Зависимость размерного износа резца от пути резания. Периоды износа:

- I* — интенсивный;
- II* — нормальный;
- III* — разрушение

Протекание износа во времени характеризуется кривой (рис. 1.6.24), состоящей обычно из трех участков. Участок *I* характеризуется довольно быстрым возрастанием подъема кривой. Износ на этом участке получил название первоначального износа, его интенсивность, в основном, зависит от степени шероховатости поверхности инструмента, соприкасающейся с поверхностью детали, получаемой в процессе ее обработки. После окончания периода первоначального износа начинается участок *II* нормального размерного износа, характеризуемого почти пропорциональным его возрастанием от пути обработки. Наконец, участок *III* кривой характеризует интенсивный износ инструмента, приводящий нередко к его разрушению. Обычно в конце участка нормального износа прибегают к смене инструмента.

С точки зрения достижения требуемой точности обработки деталей наиболее целесообразным является использование участка кривой нормального размерного износа инструмента, угол наклона которой характеризует интенсивность размерного износа.

Наибольшее влияние на размерную стойкость инструмента оказывают скорость резания и ее колебания. В ряде случаев существенное, а иногда и решающее значение оказывают вибрации, возникающие в технологической системе, а также колебания силы резания, возникающие вследствие ряда причин. Основными причинами этого явления чаще всего являются колебания припусков на обработку и свойств материала заготовки.

Размерная стойкость инструмента больше всего зависит от качества материала режущего инструмента, его однородности и стабильности качества изготовления инструмента.

Относительный износ зависит от метода обработки, обрабатываемого материала, материала режущего инструмента, режимов резания и геометрии режущего инструмента. Обрабатываемый материал и, в частности, его твердость оказывают большое влияние на относительный износ инструмента. С повышением твердости материала относительный износ возрастает.

Если обтачиванию подвергается длинный вал большого диаметра, то по мере перемещения резца от задней бабки к передней диаметр обрабатываемой поверхности из-за износа резца непрерывно возрастает и поверхность получается слабо конической. Появление конусности также наблюдается при растачивании глубоких отверстий.

При обработке партии небольших заготовок искажение формы поверхностей невелико. Размерный износ инструмента в этом случае сказывается на непрерывном увеличении размеров деталей в партии.

Затупление режущего инструмента вследствие его износа вызывает увеличение радиальной составляющей силы резания. За период стойкости, например резца, сила P_y может возрасти на несколько десятков процентов от ее первоначального значения. При больших значениях P_y и пониженной жесткости технологической системы погрешности обработки, вызванные возрастанием радиальной составляющей силы резания, могут быть сопоставимы по величине с погрешностями в результате размерного износа инструмента.

При абразивной обработке на точность влияет размерный износ шлифовальных кругов. В процессе шлифования круги могут работать с затуплением и самозатачиванием. В первом случае затупившиеся зерна не отделяются и поры круга забиваются стружкой; износ круга при этом сравнительно мал. Для восстановления режущих свойств шлифовального круга его правят, срезая тонкий наружный слой. Во втором случае затупленные зерна силами резания вырываются из связки круга. При этом режущая поверхность круга непрерывно обновляется, так как в работу вступают новые незатупленные зерна, т.е. происходит самозатачивание круга. Работа с самозатачиванием связана с большим износом круга. При этом круг также правят для восстановления геометрических форм, так как его износ протекает неравномерно.

Интенсивность износа шлифовального круга зависит от его диаметра. Круги большого диаметра, обычно применяемые при наружном круг-

лом шлифовании, изнашиваются во много раз медленнее, чем круги, используемые при внутреннем шлифовании. Если правка кругов при круглом шлифовании производится через 15 – 20 мин, то на внутришлифовальных станках, работающих по автоматическому или полуавтоматическому циклу, круг правят перед каждым чистовым проходом.

1.6.2.4. Влияние остаточных напряжений на точность изготовления детали

Влияние остаточных напряжений сказывается на точности детали через их перераспределение как в заготовке по мере ее обработки, так и в готовой детали.

Перераспределение остаточных напряжений в заготовке порождает ее деформации, вызывающие погрешности обработки после операции и на последующей операции за счет искажения формы технологических баз и нарушения их относительного расположения.

Большое влияние на величину остаточных напряжений, характер их перераспределения оказывает метод получения заготовки и их обработки.

При получении заготовки литьем возникают внутренние напряжения из-за того, что температура толстых и тонких частей отливки получается неодинаковой при переходе из области пластических в область упругих деформаций.

Чем медленнее происходит охлаждение отливки в этом интервале температур и чем меньше разница в толщине ее стенок, тем меньше остаточные напряжения в остывшей заготовке. Особенно большими остаточные напряжения получаются в местах резкого изменения сечения отливок.

Если подвергнуть отливку механической обработке, то имеющееся в ней равновесие остаточных напряжений из-за снятия поверхностных слоев металла нарушается и заготовка деформируется. Эта деформация происходит не мгновенно, а в течение довольно продолжительного промежутка времени. При передаче предварительно обработанной заготовки на последующую отделку (без разрыва во времени между ними) деформация продолжается и после приемки готовой детали, что ведет к недоразумениям при сборке и последующей эксплуатации машин. Деформации маложестких деталей часто получаются очень значительными.

При получении заготовки свободной ковкой или горячей штамповкой остаточные напряжения возникают из-за неравномерного охлажде-

ния заготовок и особенно сильно сказываются при нерациональной конструктивной форме последних. Эти напряжения имеют большое влияние на деформацию неустойчивых, маложестких заготовок (длинные валики, коленчатые валы и пр.).

При получении заготовок сваркой тоже возникают остаточные напряжения в результате неравномерного нагрева и остывания металла в процессе сварки. При перемещении источника тепла вдоль шва имеет место интенсивный нагрев металла в зоне наплавки. Смежные участки металла, имея более низкую температуру, препятствуют расширению нагретого металла и создают в нем напряжение сжатия. При остывании в наплавленном слое возникают остаточные напряжения растяжения, так как окружающий металл тормозит уменьшение его объема.

Величина этих напряжений иногда достигает предела текучести металла. При сварке заготовок из низкоуглеродистых сталей возникают в основном остаточные напряжения первого рода, при сварке заготовок из закаливающихся сталей – напряжения всех трех родов.

Сварочные напряжения вызывают остаточные деформации в сварной конструкции, величина которых может быть значительно больше допуска на размеры готовой детали. Эти напряжения следует учитывать при конструировании и изготовлении технологической оснастки, так как от этого зависит точность обработки и сборки. Сварочные деформации бывают большими в узлах, свариваемых из материалов, обладающих меньшей теплопроводностью и большим коэффициентом температурного расширения. В узлах из коррозионно-стойкой стали деформации больше, чем в узлах из низкоуглеродистых сталей. Деформации при сварке изделий из алюминия меньше, чем при сварке изделий из низкоуглеродистых сталей.

Величина остаточных деформаций зависит от расположения швов, свойств материала, режима сварки, а также от последовательности наложения швов.

При получении заготовки методом пластического деформирования возникает наклеп и, как следствие, внутренние напряжения. При прокатке и волочении прутков материал с наружной поверхности деформируется сильнее, чем внутри. Поэтому в заготовках, полученных данными методами, наблюдаются значительные остаточные растягивающие напряжения в поверхностных слоях и сжимающие напряжения внутри. Исследования показывают, что остаточные напряжения в прокате нередко бывают очень большими и доходят до предела текучести. На рис. 1.6.25, а дана эпюра распределения этих напряжений в сечении, взятом на дос-

таточно большом расстоянии от концов. Если заготовку из проката разрезать вдоль, то ее концы разойдутся (рис. 1.6.25, а). Изгиб концов произойдет в результате нарушения равновесия остаточных напряжений в материале заготовки.

При точении недостаточно точно зацентрированной заготовки из проката снимается неравномерный припуск. В результате происходит нарушение равновесия напряжений и обработанная деталь (при отношении $l/d > 30$) заметно искривляется. По той же причине прорезка длинных шпоночных канавок в заготовках из проката часто ведет к искривлению деталей. Нежелательное влияние остаточных напряжений на последующую механическую обработку может быть устранено отжигом заготовок.

Часто заготовки подвергают холодной правке, после которой возникают остаточные напряжения. Холодную правку применяют для устранения искривленности заготовок и готовых деталей. Правка до обработки уменьшает снимаемые припуски и сокращает время выполнения операции. Холодной правке подвергают гладкие и ступенчатые валы, шатуны, коленчатые и распределительные валы двигателей, планки, пластины, веретена и многие другие детали общего и специального назначения. Если заготовка после холодной правки подвергается обработке, то равновесие остаточных напряжений, полученное в результате правки, нарушается и заготовка деформируется.

Если правке подвергают готовые детали, то в их материале также возникают уравновешенные остаточные напряжения. С течением времени наблюдается некоторое искривление выправленных деталей, из-за которого в машине может произойти нарушение зазоров.

Часто заготовки подвергаются термической обработке, в результате которой возникают внутренние напряжения, являющиеся следствием неравномерности нагрева и охлаждения деталей, а также результатом структурных изменений их материала. Термические напряжения вызывают деформацию (коробление) деталей и часто бывают настолько большими, что от их действия возникают трещины.

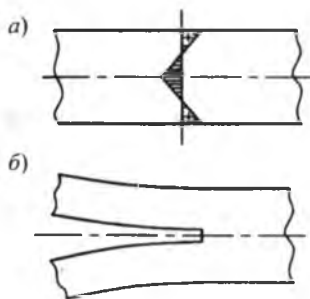


Рис. 1.6.25. Напряжения в заготовке, полученной методом пластического деформирования:

а — эпюра напряжений;
б — заготовка после разреза, полученная точением

Сплошная закалка дает большую деформацию, чем поверхностная закалка после нагрева токами высокой частоты. Деформации при термической обработке влияют на точность детали и величину припуска под последующую механическую обработку.

1.6.3. ОБРАЗОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ

Поверхностный слой детали формируется под воздействием технологических факторов и внешней среды. В свою очередь технологические факторы, их уровень и степень воздействия зависят от метода, режима обработки и материала детали. Рассмотрим формирование наиболее важных показателей качества поверхностного слоя, таких как шероховатость, упрочнение, остаточные напряжения.

1.6.3.1. Образование шероховатости поверхности детали

Основными причинами, вызывающими шероховатость поверхности, являются геометрические факторы, пластические и упругие деформации металла в поверхностном слое и вибрации.

Геометрия режущей кромки инструмента оказывает влияние на шероховатость поверхности. Характер влияния этого фактора зависит от кинематики относительного движения режущего инструмента и заготовки. Рассмотрим влияние геометрической формы лезвия на шероховатость поверхности, полученной при обработке на токарном станке. За один оборот заготовки вершина резца переместится вдоль образующей цилиндрической поверхности на шаг, равный подаче, из одного положения в другое. При этом на обработанной поверхности останется часть материала, не снятая резцом и образующая остаточный гребешок. Величина и форма гребешка зависят от подачи на оборот и формы режущей части резца, характеризуемой углами ϕ и ϕ_1 и радиусом вершины. При наличии у лезвия радиуса округления шероховатость R_z будет меньше. По мере затупления лезвия на режущих кромках появляются зазубрины, что также влияет на шероховатость. По данным исследований, при точении шероховатость от затупления возрастает на 50...60 %, при фрезеровании цилиндрическими фрезами – на 100...115 %, торцовыми фрезами – на 35...45 %, сверлами – на 30...40 % и развертывании – на 20...30 %.

При цилиндрическом фрезеровании на шероховатость в направлении продольной подачи стола оказывает влияние радиальное биение фрезы, а при фрезеровании торцевой фрезой – торцовое биение.

При шлифовании на шероховатость поверхности оказывают влияние геометрические характеристики абразивных зерен, расстояние между ними. При шлифовании каждое абразивное зерно прорезает в материале царапину. После правки шлифовального круга алмазным инструментом на его поверхности появляются винтовые неровности, которые тоже переносятся на обрабатываемую поверхность. В зависимости от метода обработки и типа режущего инструмента неровности на поверхности детали имеют соответствующее направление.

Пластические и упругие деформации материала оказывают при обработке резанием влияние на поверхностный слой детали. Поверхностный слой детали из пластических материалов деформируется, в результате возникают неровности обработанной поверхности. При обработке хрупких металлов имеет место вырывание отдельных частиц металла.

Пластические деформации при обработке резанием лезвийным инструментом зависят от скорости резания. В диапазоне скоростей 20...40 м/мин под действием усилий, прижимающих слои металла к передней поверхности резца, и высокой температуры слои металла привариваются к передней и частично к задней поверхности резца, образуя нарост, который изменяет форму режущей кромки лезвия и резко увеличивает шероховатость. По мере возрастания скорости резания количество теплоты, выделяемой в процессе образования стружки, увеличивается, нарост, нагреваясь быстрее остальной части зоны деформации, разрушается и шероховатость уменьшается.

Во время отделения стружки резцом часть металла заготовки, лежащей под ним, поднимается его закругленной частью, подвергаясь упругой и пластической деформации. После прохождения резца этот несрезанный слой металла частично и неравномерно упруго восстанавливается и вызывает трение по задней поверхности, тем самым увеличивается высота неровности профиля поверхности. При высоких скоростях резания глубина пластически деформированного слоя уменьшается.

Вибрации, возникающие в технологической системе и создающие относительные колебательные движения заготовки и режущего инструмента, также являются причиной возникновения шероховатости. При этом чем выше амплитуда колебаний, тем больше шероховатость.

1.6.3.2. Образование отклонения физико-механических свойств поверхностного слоя детали

Физико-механические свойства поверхностного слоя характеризуются структурой, глубиной, степенью упрочнения (наклепа), остаточными напряжениями. Эти свойства поверхностного слоя изменяются под влиянием совместного силового и теплового воздействий. В зависимости от метода обработки может доминировать одно из них. Различают три зоны (рис. 1.6.26) напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя металлических деталей: 1 – резко выраженной пластической деформации, которая характеризуется значительным искажением кристаллической решетки, измельченными зернами и значительным увеличением микротвердости; 2 – упругопластической деформации, характеризующейся вытянутыми зернами, наволакиванием одних зерен на другие и значительным уменьшением микротвердости; 3 – переходной упругодеформированной, представляющей зону влияния деформации и зону перехода к строению основного металла.

Глубина упрочненного слоя колеблется от двух до сотен микрометров. Степень упрочнения u_n , %, характеризует отклонения твердости поверхностного слоя H_n от твердости основного материала H_0 :

$$u_n = \frac{H_n - H_0}{H_0} 100 [\%].$$

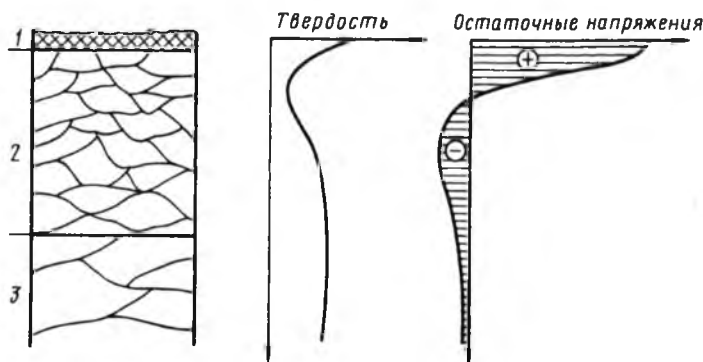


Рис. 1.6.26. Характеристики напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали

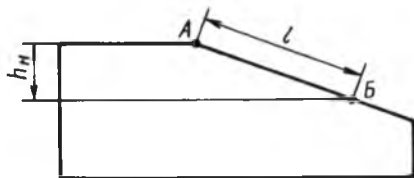


Рис. 1.6.27. Эскиз образца для определения глубины наклепа h_n

Обычно u_n составляет 120...160 %. Наиболее простым способом определения глубины h_n наклепа является измерение микротвердости исследуемого образца на притертой отполированной поверхности косого среза под небольшим углом (рис. 1.6.27). Применяют также и рентгеновские методы.

Остаточные напряжения в поверхностном слое могут быть приблизительно равны пределу текучести материала, а глубина их распределения может превышать глубину наклепа.

Различия поверхностного слоя по глубине пластических деформаций напряженно-деформированного и структурных состояний обуславливают появление в нем остаточных напряжений.

Остаточные напряжения измеряют по деформации образца, происходящей после снятия с него напряженного слоя химическим или электрохимическим способом. Широко распространено определение напряжений по методике академика Н.Н. Давиденкова. Согласно методике тангенциальные и осевые (нормальные) напряжения l рода определяют на образце (в виде разрезанного кольца) при последовательном удалении поверхностных слоев. В процессе снятия с кольца тончайших поверхностных слоев методом электрополирования непрерывно регистрируют значения деформаций с помощью тензодатчиков. При этом все поверхности кольца, кроме исследуемой, защищают от воздействия электролита соответствующим покрытием.

Упрочнение поверхностного слоя происходит при силовом воздействии в процессе резания, в результате которого возникают пластические деформации, сопровождающиеся измельчением и вытягиванием кристаллических зерен в направлении деформации, искривлением плоскостей скольжения, возникновением напряжений и искажениями кристаллической решетки. Степень и глубина упрочнения возрастают с увеличением сил и продолжительности их воздействия, а также степени пластической деформации. Пластическая деформация означает сдвиговые взаимоперемещения элементов структуры металла по слабым направлениям. Сопротивление металла деформации возрастает и происходит его упрочнение.

В процессе деформации металл поглощает часть энергии, становится термически неустойчивым и в нем самопроизвольно возникают процессы "отдыха" – разупрочнения, частично восстанавливающие его первоначальные свойства.

Таким образом, пластическая деформация сопровождается упрочнением и разупрочнением, соотношение которых зависит от условий деформации и определяет качество поверхностного слоя. При большей температуре и длительности теплового воздействия возможно полное снятие упрочнения, возникшего в результате силового воздействия.

Степень и глубина упрочнения зависят от метода и режима механической обработки.

Силовой фактор вызывает пластические деформации и порождает только сжимающие напряжения; тепловой фактор вызывает растягивающие напряжения в поверхностном слое. Все это объясняется следующим образом.

Силовой фактор. Вследствие действия сил трения по задней поверхности инструмента поверхностный слой подвергается растяжению. При этом деформация его верхней части до какой-то глубины будет пластической, а ниже – только упругой. После прохода инструмента упруго растянутая (нижняя) часть слоя, стремясь сжаться, сожмет пластически деформированную (верхнюю) часть слоя. В результате верхняя часть слоя будет сжата, а нижняя – частично растянута.

Тепловой фактор. Верхняя часть поверхностного слоя (как более нагретая) стремится удлиниться, а нижняя, более холодная, препятствует этому. Поэтому в верхней части возникают напряжения сжатия, а в нижней – растяжения. При дальнейшем повышении температуры напряжения в верхней части поверхностного слоя превысят предел текучести, что вызовет в нем дополнительную пластическую деформацию сжатия.

При последующем охлаждении верхняя часть поверхностного слоя стремится укоротиться на величину большего растяжения вследствие пластической деформации (нижняя часть не претерпела пластической деформации). В результате в верхней части возникнут растягивающие напряжения, а в нижней – напряжение сжатия.

Большое влияние на степень и глубину упрочнения оказывает скорость резания. Влияние скорости резания на степень и глубину упрочнения не является монотонным. Существует оптимальная скорость резания, при которой эти показатели будут минимальными. Увеличение подачи не меняет характера влияния скорости резания на степень и глубину упрочнения, а только уменьшает значение оптимальной скорости резания.

При уменьшении переднего угла от $+15^\circ$ до -15° глубина упрочнения увеличивается почти в 3 раза, а степень упрочнения – на 13 %. Увеличение радиуса скругления режущего лезвия повышает степень и глубину упрочнения при всех подачах, особенно если он больше, чем толщина среза. Существенно влияет на упрочнение увеличение износа инструмента по задней поверхности. Наибольшее влияние на упрочнение оказывает фаска износа на задней грани при скоростях резания, больших или меньших оптимальной. Например, при увеличении фаски износа от 0 до 0,4 мм и оптимальной скорости резания глубина упрочнения увеличивается на 20 мкм, а степень упрочнения – на 4 %. А при обработке со скоростями, меньшими или большими оптимальной, глубина упрочнения возрастает на 55...70 мкм, а степень упрочнения – на 8...10 %.

Стали и сплавы, обладая различными прочностными и пластическими свойствами, по-разному упрочняются при обработке резанием.

Марка инструментального материала в широком диапазоне скоростей резания значительно влияет на коэффициент трения на задней поверхности инструмента, а следовательно, на степень и глубину упрочнения. Инструментальный материал, обеспечивающий меньшее значение коэффициента трения, формирует подповерхностный слой детали с меньшими степенью и глубиной упрочнения. Например, поверхность, обработанная резцом из сплава T14K8, имеет меньшую глубину и степень упрочнения по сравнению с поверхностью, обработанной резцом из сплава BK8. Это связано с тем, что с увеличением содержания карбидов вольфрама повышается склонность к адгезионному взаимодействию материалов инструмента и заготовки, увеличивается коэффициент трения на задней поверхности.

Формирование подповерхностного слоя у закаленных и незакаленных сталей (чугунов) при шлифовании происходит по-разному. Кратковременные тепловые импульсы при шлифовании незакаленных сталей не могут привести к структурным изменениям в подповерхностном слое, так как не успевают произойти необходимые для этого диффузионные процессы. Процесс стружкообразования при шлифовании сопровождается значительными пластическими деформациями в подповерхностном слое, что способствует упрочнению. Однако высокие температуры в зоне резания вызывают разупрочнение материала, и его наклеп при этом снижается.

Особенностью формирования подповерхностного слоя при шлифовании закаленной стали является то, что ее структура может изменяться под действием даже кратковременных тепловых импульсов, так как при

этом в основном происходят бездиффузионные процессы, а распад твердых растворов требует значительно меньших тепловых затрат, чем их образование. При низкой производительности процесса и нормальной (30 м/с) или пониженной скорости шлифования подповерхностный слой упрочняется (наклепывается) так же, как у незакаленных сталей. При повышении производительности и недостаточном охлаждении происходит отпуск мартенсита (прижог отпуска) и микротвердость материала становится ниже исходной. При дальнейшем повышении производительности и обильном охлаждении наблюдается вторичная закалка (прижог закалки).

Итак, выше были изложены физико-механические основы возникновения погрешностей изготовления изделий. Погрешности изготовления изделия формируются на технологическом переходе и на протяжении технологического процесса. Поэтому рассмотрим эти этапы отдельно.

1.6.4. ОБРАЗОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПЕРЕХОДЕ

Принимая во внимание различие технологических переходов по обработке заготовки и сборки изделия, рассмотрим в такой же последовательности и образование погрешностей изготовления изделий на этих технологических переходах.

1.6.4.1. Образование погрешностей изготовления детали на технологическом переходе

Погрешность обработки является результатом нарушения заданного закона относительного движения технологических баз заготовки и рабочих поверхностей инструмента.

Нарушение закона относительного движения заготовки и инструмента происходит в процессе статической и динамической настройки технологической системы.

Задача статической настройки технологической системы – достижение заданного относительного положения и траектории движения рабочих поверхностей технологической системы без рабочих нагрузок.

Задача динамической настройки технологической системы – достижение заданного относительного положения и траектории движения рабочих поверхностей технологической системы при рабочих нагрузках.

Отсюда суммарная геометрическая погрешность изготовления детали или сборочной единицы

$$\omega = \omega_y + \omega_c + \omega_d,$$

где ω_y – погрешность установки; ω_c – погрешность статической настройки технологической системы; ω_d – погрешность динамической настройки технологической системы.

Установка включает:

базирование и закрепление сменных элементов (приспособления, инструмента, заготовки или детали при сборке изделия) технологической системы с требуемой точностью.

Статическая настройка включает:

настройку размерных и кинематических цепей на заданный закон относительного движения рабочих поверхностей технологической системы с заданной точностью при отсутствии рабочих нагрузок.

На точность статической настройки оказывают влияние, главным образом, собственные геометрические погрешности технологической системы и погрешности установки сменных элементов.

При обработке в результате действия нагрузок возникают упругие и тепловые перемещения, вибрации и др., которые нарушают заданное относительное движение рабочих поверхностей, достигнутое во время статической настройки. Поэтому, чтобы достичь заданной геометрической точности изделия, необходимо учитывать обе составляющие суммарной погрешности и еще на этапе проектирования технологического процесса предусматривать мероприятия, обеспечивающие сумму погрешностей меньше заданного допуска.

Описать аналитически нарушение закона относительного движения заготовки и инструмента, а следовательно, и погрешность обработки можно через отклонения величины замыкающего звена размерной цепи технологической системы. Замыкающим звеном размерной цепи технологической системы является расстояние между технологическими базами заготовки и рабочими поверхностями (например, режущие кромки реза) обрабатывающего инструмента.

В процессе статической настройки на этапе установки заготовка и инструмент включаются в размерные и кинематические цепи технологической системы. Для этого они должны занять требуемое положение относительно соответствующих баз станка.

Заготовка устанавливается на столе станка или в приспособлении технологической системы и должна быть координирована своими технологическими базами относительно вспомогательных баз станка, по которым перемещается или вращается сборочная единица системы, несущая заготовку.

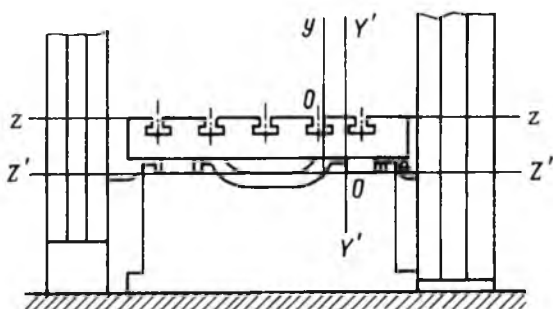


Рис. 1.6.28. Координатные системы продольно-строгального станка

Инструмент при установке тоже должен занять своими рабочими поверхностями положение относительно другого комплекта вспомогательных баз станка, по которым перемещается или вращается сборочная единица системы, несущая инструмент. У станков такими вспомогательными базами обычно являются направляющие станины. Например, при обработке деталей на продольно-строгальном станке роль базы для установки заготовки выполняет (рис. 1.6.28) сочетание двух плоских горизонтальных направляющих станины ($Z' - Z'$), образующих одну координатную плоскость, второй координатной плоскостью является одна из вертикально расположенных направляющих станины ($Y' - Y'$). Часто для удобства установки заготовки используют систему ZOY , настроенную от плоскости рабочего стола и боковой поверхности паза.

Для установки резца комплектом баз являются направляющие стойки станка, по которым перемещается суппортная группа вместе с резцедержателем и резцом (рис. 1.6.29). Поэтому при установке резца должен занять определенное положение в координатной системе, построенной на этих направляющих.

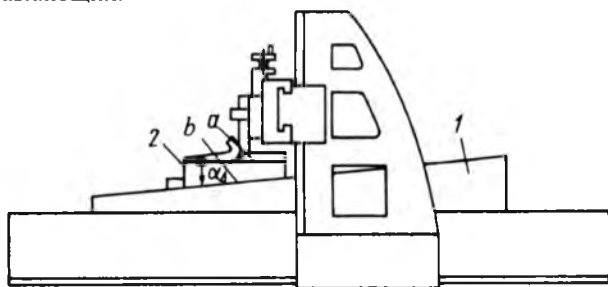


Рис. 1.6.29. Влияние отклонения рабочей плоскости b стола 1 на погрешность установки заготовки 2 и изготовленной поверхности a

Таким образом, соответствующие вспомогательные базы станка выступают в роли координатных систем, относительно которых заготовка и инструмент должны занять требуемое положение. Как правило, такими базами являются комплекты вспомогательных баз станка в виде плоских или круговых направляющих. Например, у вертикально-фрезерного станка базами для установки фрезы на станке являются отверстия в стойке, в которых вращается шпиндель. А для установки заготовки базами станка являются горизонтальные и вертикальные поверхности направляющих станины, по которым стол совершает возвратно-поступательные движения.

После того, как заготовка и инструмент правильно координированы на станке, их положения должны быть зафиксированы и сохранены в течение всего времени выполнения операции. Для этого и заготовку, и инструмент закрепляют тем или иным способом.

В результате базирования и закрепления заготовка и инструмент будут координированы относительно баз станка с некоторой погрешностью, которую называют *погрешностью установки*.

Контролировать погрешность установки сложно, так как доступ к базам станка, как правило, затруднен, поэтому на станках обычно делают специально предназначенные для этой цели поверхности, выступающие в роли координатных плоскостей измерительных баз.

Например, у предельно-строгального (рис. 1.6.28) станка такими базами являются рабочая плоскость стола ($X - X$) и вертикальная стенка одного из Т-образных пазов ($Y - Y$) стола. При этом, как правило, базой является средний паз стола, выполняемый с высокой точностью.

Следует помнить, что несовпадение измерительных баз с базами технологической системы увеличивает погрешность установки.

Надо отметить, что количество комплектов баз станка, относительно которых устанавливаются заготовка и инструмент, равно количеству направляющих.

Выбор баз станка для установки заготовки и инструмента зависит от поставленной задачи. Рассмотрим в качестве примера токарный универсальный станок. Формообразующее движение токарного станка осуществляется посредством вращательного движения заготовки и поступательного движения резца. Траектория движения резца будет определяться двумя комплектами направляющих: комплект направляющих станины обеспечивает продольное перемещение резца, комплект направляющих продольных салазок – поперечное перемещение резца. Вращательное движение заготовки обеспечивается посадочными отверстиями в коробке скоростей под шпиндель станка.

Таким образом, у токарного станка имеются три комплекта направляющих, которые определяют траекторию движения исполнительных поверхностей, т.е. три комплекта баз станка. При этом продольное и поперечное движения резца могут осуществляться последовательно или одновременно. В этом случае возникает проблема выбора баз станка для установки резца.

С целью анализа процесса установки резца и заготовки построим координатные системы на основных базах резца Σ_p , технологических базах заготовки Σ_z , посадочных отверстиях под шпиндель $\Sigma_{\delta 1}$, направляющих станины $\Sigma_{\delta 2}$ и поперечных направляющих продольных салазок $\Sigma_{\delta 3}$ (рис. 1.6.30).

В задачу входит выбор баз станка для заготовки и резца. При этом следует подчеркнуть, что в силу невозможности изготовления станка без погрешностей, всегда объективно существуют неточности относительно расположения комплектов направляющих. Применительно к токарному станку имеет место погрешность расположения трех комплектов направляющих: $\Sigma_{\delta 1}$, $\Sigma_{\delta 2}$, $\Sigma_{\delta 3}$.

Установка заготовки. Пусть на станке нарезается цилиндрическая резьба. Для установки заготовки на станке имеется только один комплект направляющих, с помощью которого в процессе движения заготовки определяется ее положение. Таким комплектом направляющих являются поверхности отверстий коробки скоростей под опорные шейки шпинделя $\Sigma_{\delta 1}$.

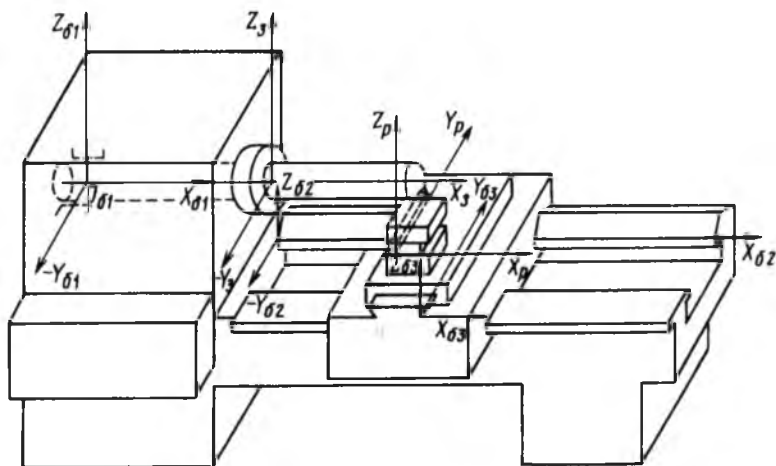


Рис. 1.6.30. Координатные системы баз токарного станка

Погрешность установки заготовки Σ_3 относительно системы Σ_{61} по угловым координатам ψ и θ вызовет изменение величины радиального биения заготовки вдоль ее оси.

Погрешность установки заготовки по угловой координате ϕ приведет к угловому смещению положения захода резьбы на торце. Теоретически нет разницы между установками заготовки по координате ϕ относительно системы Σ_{61} или относительно системы Σ_{62} . Для выбора базы установки в этом случае надо знать, относительно какой системы установлен резец. И заготовка, и резец для сведения погрешности настройки к минимуму должны быть установлены относительно одной и той же системы координат: Σ_{61} или Σ_{62} . Учитывая конструкцию токарного станка, сначала должен быть установлен резец по координате ϕ , а затем заготовка, так как заготовкой легко осуществить регулировку ее положения по координате ϕ .

Отклонения положения системы Σ_3 относительно системы Σ_{61} по линейным координатам Y и Z вызовут одинаковое радиальное биение заготовки на всем протяжении оси заготовки. Погрешность установки заготовки по координате X вызовет погрешность линейного размера, определяющего положение резьбы на заготовке. Установка заготовки по координате X также может быть осуществлена относительно системы Σ_{61} или Σ_{62} при условии, что резец будет установлен по координате X относительно той же системы координат. Поскольку на станке имеется механизм регулировки положения резца по координате X , постольку целесообразно сначала установить заготовку, а затем резец.

Если установить заготовку по координатам ψ , θ , y , z относительно направляющих станины (Σ_{62}), то в силу наличия погрешностей относительного положения баз станка Σ_{61} и Σ_{62} , обусловленных погрешностью изготовления станка, появятся дополнительные погрешности установки. Таким образом, заготовку следует устанавливать относительно координатной системы Σ_{61} , построенной на базах станка под шпиндель (по координатам ϕ и X заготовка может быть установлена относительно системы Σ_{62}).

Установка резца. Для обеспечения формообразующего движения при нарезании цилиндрической резьбы резец должен совершать поступательное движение вдоль оси шпинделя ($0_{61}X_{61}$). Это движение обеспечивается направляющими станины станка (Σ_{62}). Учитывая погрешность относительного положения баз станка Σ_{61} и Σ_{62} , необходимо выбрать такую базу станка из перечисленных двух, при которой влияние погрешности их относительного положения на погрешность обработки будет минимальным.

Согласно известным рекомендациям, установим резец относительно базы станка Σ_{62} и обозначим погрешность положения Σ_{62} относительно Σ_{61} через отклонения по шести координатам: Δx , Δy , Δz , $\Delta \varphi$, $\Delta \psi$, $\Delta \theta$.

Отклонение $\Delta \psi$ установки резца по угловой координате ψ вызовет погрешность ширины профиля резьбы (рис. 1.6.31, а). Кроме того, изменятся углы λ , α_1 и α_2 , что ухудшит условия резания боковыми режущими кромками резца. В связи с этим резец по координате следует устанавливать относительно системы Σ_{61} .

Отклонение $\Delta \varphi$ вызовет погрешность профиля резьбы по высоте, так как проекция MA' на MA будет меньше последней (рис. 1.6.31, б). При этом изменятся передний и задний углы резца, поэтому и по координате φ резец надо устанавливать относительно системы Σ_{61} .

Погрешность $\Delta \theta$ приводит к тому, что профиль резьбы окажется не перпендикулярным оси заготовки (рис. 1.6.31, в). Кроме того, изменятся главный и вспомогательный углы резца в плане. В связи с этим по угловой координате θ резец надо устанавливать относительно системы Σ_{61} .

Отклонения по линейным координатам, в частности по координате Δy , вызовут погрешность среднего диаметра резьбы, по координате Δx – погрешность положения резьбы по оси заготовки, и Δz – погрешность среднего диаметра резьбы и искажение профиля резьбы.

Таким образом, резец следует устанавливать относительно направляющих шпинделя Σ_{61} , а не относительно направляющих станины станка Σ_{62} . Однако, в отличие от установки заготовки на станке, для резца имеется механизм перемещения его по линейным координатам X и Y , что позволяет легко компенсировать погрешности Δx и Δz . Аналогично должны устанавливаться и другие сменные элементы технологической системы.

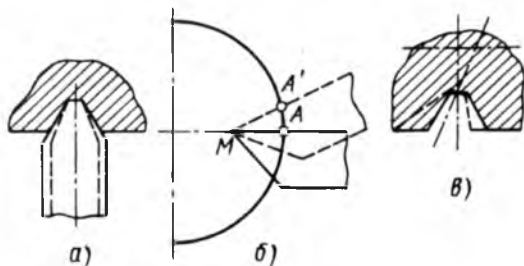


Рис. 1.6.31. Влияние угловых отклонений положения резца на точность профиля резьбы (штриховой линией показано положение резца в результате погрешности углового положения резца)

На основании проведенного анализа выбора баз станка можно сделать выводы:

1. При проектировании и осуществлении операций механической обработки деталей необходимо решать задачу обеспечения точной установки не только заготовки, но и других сменных элементов технологической системы, таких как режущий инструмент, приспособления для закрепления заготовки и режущего инструмента и др.

2. Под погрешностью установки сменного элемента будем понимать отклонения по шести координатам положения системы координат, построенной на основных базах сменного элемента относительно системы координат, построенной на комплекте направляющих, выбранных в качестве баз станка.

3. Погрешность установки заготовки оказывает непосредственное влияние на точность обработки и косвенно через распределение припуска на обрабатываемых поверхностях; погрешность установки режущего инструмента непосредственно влияет на точность обработки, а также на параметры геометрии резания.

4. Станок, как правило, имеет несколько комплектов направляющих, которые могут выступать при установке в качестве баз станка; число комплектов баз станка определяется числом элементарных движений (вращение, поступательное движение) заготовки и режущего инструмента, обеспечивающих формообразующее движение.

5. Установка заготовки или режущего инструмента может производиться по разным координатам относительно разных комплектов баз станка (чаще относительно двух комплектов баз).

6. Точность установки, когда отсутствуют механизмы коррекции, осуществляется методами полной или неполной взаимозаменяемости. Если имеются механизмы коррекции, то точность установки можно достигнуть методом регулировки.

7. Смена координаты движения заготовки или режущего инструмента может изменить выбор комплектов баз станка.

8. В случае смены координаты движения заготовки или режущего инструмента при неизменной установке последних будет иметь место изменение погрешности установки.

После установки заготовки и инструмента необходимо осуществить статическую настройку технологической системы при отсутствии рабочих нагрузок.

В задачу статической настройки входит обеспечение закона относительного движения и положения технологических баз заготовки и рабо-

чих поверхностей инструмента. Это достигается путем настройки размерных и кинематических цепей технологической системы, в которые включаются своими размерами заготовка и инструмент.

С помощью настройки размерных цепей определяется начальное положение рабочих поверхностей и инструмента относительно технологических баз заготовки. Например, при установке на токарном станке заготовки в центрах надо обеспечить требуемое расстояние между вершиной резца и линией, проходящей через центровые гнезда заготовки.

С помощью настройки кинематических цепей обеспечиваются заданная траектория и скорости движения инструмента относительно технологических баз заготовки.

Во время обработки заготовки между рабочими поверхностями инструмента и материалом заготовки возникают силы резания, силы трения, образуется тепло, стружка и происходит ряд явлений, сопутствующих обработке. Это порождает отклонения фактического относительного движения инструмента и заготовки от заданного, в результате чего возникает погрешность обработки. Поэтому после статической настройки осуществляют динамическую настройку размерных и кинематических цепей технологической системы. Задачей этой настройки является сведение к минимуму отклонений закона относительного движения заготовки и инструмента от заданного, возникающих в процессе обработки.

Каждая из настроек осуществляется с соответствующими погрешностями. В свою очередь каждая из погрешностей представляет сумму систематических и случайных погрешностей, порождаемых большим количеством факторов, действующих во время установки обрабатываемой заготовки, статической и динамической настройки кинематических и размерных цепей технологической системы.

Основными причинами погрешности установки заготовки и инструмента являются:

- погрешности технологических баз, исполнительных поверхностей станка, приспособления или рабочего стола, – используемые для определения положения заготовки и инструмента;

- нарушение правила шести точек при определении положения заготовки и инструмента;

- неправильное приложение силового замыкания (создание недостаточной величины силы зажима, неправильный выбор точек применения сил зажима и последовательности приложения);

- неправильный выбор измерительных баз, метода и средств измерения;

- неорганизованная смена баз в процессе закрепления заготовки и инструмента;

- недостаточная квалификация рабочего и ряд других причин.

Основными причинами образования погрешности статической настройки ω_c размерных и кинематических цепей технологической системы являются:

- неправильный выбор измерительных баз и метода измерения;
- неправильный выбор метода и средств статической настройки размерных и кинематических цепей;
- геометрическая погрешность оборудования, приспособлений и режущего инструмента (погрешности изготовления; состояние и т.д.);
- недостаточная квалификация и ошибки, допущенные рабочим или наладчиком, производящим статическую настройку, и ряд других причин.

Основными причинами, порождающими погрешность ω_d динамической настройки размерных и кинематических цепей технологической системы, являются:

- неоднородность материала заготовки;
- колебания припусков на обработку;
- недостаточная жесткость технологической системы по координате перемещения режущего инструмента и заготовки;
- изменение направления и величины сил, действующих в процессе обработки;
- качество и состояние режущего инструмента;
- состояние оборудования и приспособлений;
- температура обрабатываемой заготовки, оборудования, приспособлений, обрабатывающего и измерительного инструмента и среды, и особенно ее колебания;
- свойства, способ применения и количество смазывающе-охлаждающей жидкости;
- неправильный выбор методов и средств для измерения погрешности динамической настройки;
- вибрация технологической системы;
- недостаточная квалификация и ошибки рабочего или наладчика и ряд других причин.

В соответствии с изложенным, в результате обработки заготовки возникает погрешность обработки, в общем случае равная:

а) алгебраической сумме погрешностей установки, статической и динамической настройки (при изготовлении одной заготовки обработки):

$$\Delta = \Delta_y + \Delta_c + \Delta_d;$$

б) сумме абсолютных значений полей рассеяния погрешностей установки, статической и динамической настройки (при изготовлении партии заготовок):

$$\omega = \omega_y + \omega_c + \omega_d.$$

1.6.4.2. Образование погрешностей изделия в процессе сборки

Сборка является заключительным этапом технологического процесса изготовления изделия. Основными выходными показателями процесса сборки являются геометрическая точность изделия, характеризующаяся точностью траектории движения движущихся элементов изделия и относительного положения деталей, а также качеством соединения: натягом в неподвижных соединениях, зазором в подвижных соединениях.

Рассмотрим образование геометрических погрешностей изделия в процессе сборки. В результате сборки изделия требуется обеспечить точность относительного положения или движения исполнительных поверхностей деталей.

Причинами образования погрешностей относительного положения исполнительных поверхностей изделия или его сборочных единиц являются:

- наличие зазоров в подвижных соединенных деталях;
- неполный комплект конструкторских баз;
- несоответствие конструкторских баз требованиям, предъявленным к базам;
- неправильное применение силового замыкания в соединенных деталях;
- упругие и тепловые деформации деталей.

Среди факторов, вызывающих геометрические погрешности сборки изделия, большее влияние оказывают геометрические неточности деталей, поступающих на сборку, а также упругие и тепловые перемещения собираемых деталей, сборочных единиц и элементов самой технологической сборочной системы. Ниже приводятся примеры влияния перечисленных факторов на точность сборки изделия.

Рассмотрим влияние погрешностей формы деталей на образование размера A_{Δ} между торцами втулок, посаженных на вал без зазора (рис. 1.6.32). В обоих случаях, представленных на рисунке, на валу расположены одни и те же втулки 1 – 3. Но во втором случае (рис. 1.6.32, б) втулка 2 повернута относительно ее первоначального положения на 180° вокруг оси, перпендикулярной оси вала, что повлекло смену точек контакта на торцах деталей, возникновение новых значений составляющих звеньев размерной цепи и изменение величины замыкающего звена на Δ .

В тех случаях, когда детали, входящие в размерные цепи изделия, соединяются по подвижным посадкам, наличие зазора в соединении приводит к появлению погрешностей на замыкающем звене.

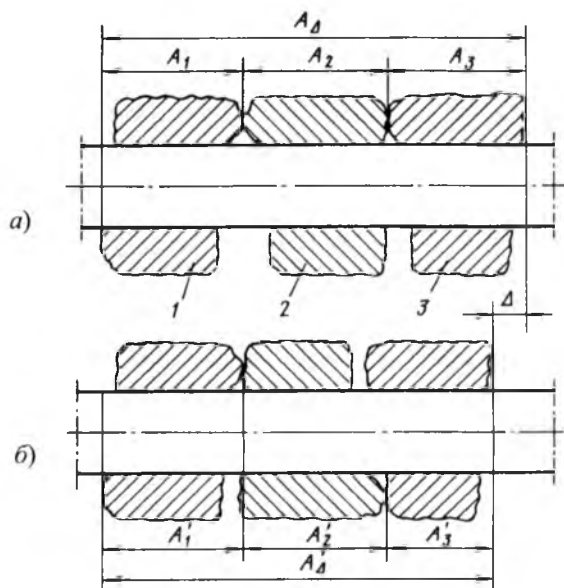


Рис. 1.6.32. Схемы образования размера A_d :

а – конструкция из трех втулок; *б* – конструкция из трех втулок, где втулка вторая повернута перпендикулярно оси вала на 180°

На рис. 1.4.25 (с. 176) показано соединение трех секций бурового трехшарошечного долота, где каждая секция базируется с помощью плоскости двугранного угла и одного штифта. Таким образом, получается неполный комплект баз, что приводит к большим погрешностям установки секций долота при сборке из-за возможности каждой лапы вращаться вокруг штифта. Этот пример подробно рассмотрен в п. 1.4.6.

Большое влияние на точность установки детали при сборке и на качество соединения оказывает силовое замыкание. Так например, при закреплении винтами, болтами и шпильками с гайками детали и сборочные единицы попадают в сложные условия. Во-первых, отклонение формы и относительного поворота поверхностей, составляющих комплекты основных и вспомогательных баз соединяемых деталей, приводят к случайному местоположению их точек контакта в момент соприкосновения. Во-вторых, отклонения поворота крепежных отверстий относительно баз деталей, неперпендикулярность площадок, на которые опираются гайки и

головки болтов относительно осей крепежных отверстий, а также перпендикулярность торцов болтов к их резьбе смещают точки приложения сил закрепления от осей крепежных деталей к краям гаек или головок болтов. В-третьих, из-за колебаний сил затяжки, сил сопротивления в резьбах силы закрепления отличаются от своих расчетных значений. В результате на закрепляемую деталь или сборочную единицу воздействует случайно сформировавшаяся система сил, и немалую роль в ее формировании будут играть конструктивные особенности детали, свойства материала, последовательность затяжки крепежных деталей и др.

Перечисленные факторы приводят к пластическому и упругому деформированию стыков, самих деталей и сборочных единиц. При этом в процессе закрепления могут возникать деформации изгиба, кручения и других видов, снижающие качество сборки и работоспособность изделий.

Схематично в утрированной форме искажение деталей в процессе приложения сил зажима показано на рис. 1.6.33 на примере сборки редуктора.

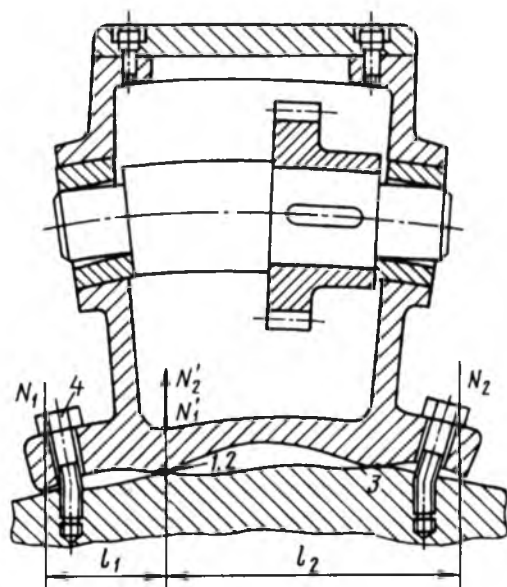


Рис. 1.6.33. Характер соединения деталей редуктора при их деформировании и наличии погрешности формы поверхностей

При установке редуктора на основание отклонения формы поверхностей баз приведут к контакту корпуса редуктора с основанием в трех случайно расположенных точках, например, в точках 1 – 3. Предположим, что точки 1 и 2 расположены одна за другой. При закреплении винтом 4 под воздействием сил $N_1 N_1'$ редуктор повернется относительно линии, соединяющей точки 1 и 2, и соприкоснется с основанием с правой стороны. При закреплении сдеформируются не только донная часть и полки корпуса, но и его боковые стенки, что может нарушить положение подшипников и привести к заземлению вала; деформируются и крепежные детали, из-за чего их работа не будет соответствовать расчетной схеме.

В связи с изложенным очевидно, что точность сборки во многом зависит от того, как прикладываются силы зажима и в какой последовательности. На рис. 1.6.34 показано – на примере фиксации положения головки блока автомобильного мотора, – как правильно закручивать гайки, чтобы свести к минимуму погрешность, обусловленную деформацией крышки.

Правильная последовательность закрепления винтов или гаек на шпильках основывается на принципе сокращения упругих деформаций сопрягаемых деталей в направлении от середины к краям или, другими словами, на принципе "располовинивания" погрешностей. Для этого вначале необходимо закрепить винты или гайки, расположенные на пересечении осей симметрии сопрягаемых поверхностей деталей, затем, в направлении осей симметрии (крест на крест), переходить постепенно к винтам, расположенным на наиболее удаленных расстояниях. Правильная последовательность затягивания гаек на рис. 1.6.34 показана последовательностью номеров гаек.

Упругие деформации деталей оказывают существенное влияние на точность сборки в тех случаях, когда детали отличаются низкой жесткостью. Так, например, базирующие детали многих машин отличаются недостаточной жесткостью, благодаря чему они легко деформируются в процессе монтажа на них ряда сборочных единиц, поэтому возникают трудности достижения требуемой точности относительного положения сборочных единиц.

При монтаже тонкостенных деталей они часто деформируются, что приводит к искажению геометрической формы, особенно в тех случаях, когда соединение осуществляется с натягом. В

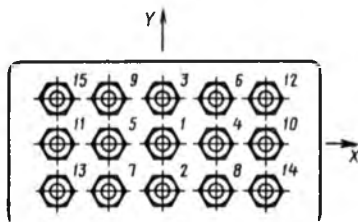


Рис. 1.6.34. Схема последовательности затягивания гаек при монтаже крышки с целью уменьшения ее деформации

таких соединениях охватываемая деталь имеет больший наружный размер, чем размер отверстия в охватывающей детали, в результате в материалах соединенных деталей возникают напряжения и силы трения, препятствующие их сдвигу. Вследствие натяга на поверхностях контакта возникают давления P , определяющие характер деформирования охватываемой и охватывающей деталей. Теоретическая диаграмма запрессовки и схема продольно-прессового соединения приведены на рис. 1.6.35, а и б.

Отклонения формы поверхностей сопряжения соединяемых деталей приводят к неравномерному распределению давления и деформаций деталей как в процессе соединения, так и по завершении его. Это вызывает неравномерные расширения охватывающей и усадку охватываемой деталей в их продольном и поперечном направлениях. В результате могут возникнуть не только отклонения формы отверстия во втулке и наружной поверхности охватывающей детали, но и отклонения относительно положения собранных деталей.

Аналогичные явления вызывает и неоднородность свойств материалов соединяемых деталей. Неравномерные упругие свойства материалов деталей в различных их частях отражаются на распределении давлений, а следовательно, на качестве и точности соединения деталей с натягом.

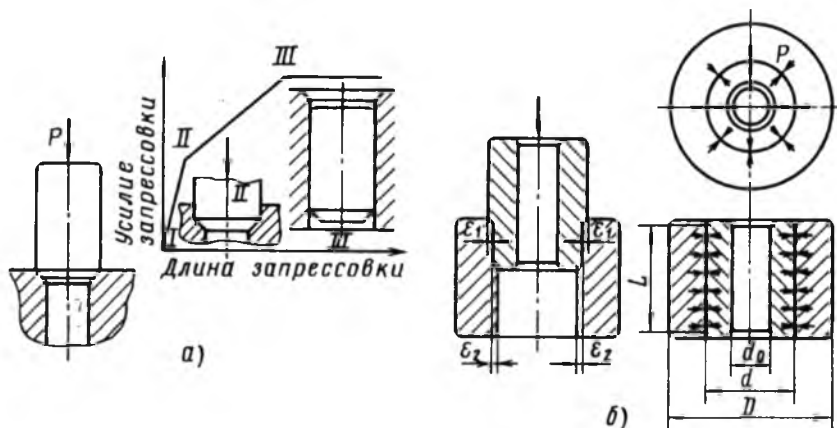


Рис. 1.6.35. Соединение деталей методом запрессовки:

а – теоретическая схема соединения:

I – ориентация деталей; II – запрессовка; III – полученное соединение;

б – схема продольно-прессового соединения и возникших при этом напряжений

Другой причиной неправильного положения детали после ее монтажа является несоответствие конструкторских баз детали требованиям, предъявляемым к базам. В результате изменяется назначение этих баз, что приводит к другой схеме базирования и погрешности установки детали.

В процессе сборки требуется обеспечить заданную точность не только относительного положения деталей в изделии, но и точность их движения. Часто в изделиях требуется обеспечить точность вращения деталей, например, шпинделей, которая характеризуется радиальным и осевым биением. В связи с этим рассмотрим причины, порождающие эти биения.

Причинами биения в осевом направлении вращающихся деталей является наличие у торцовых поверхностей отклонений от плоскостности и перпендикулярности к оси вращения у двух сопрягаемых деталей, из которых одна вращается или вращаются обе с разной частотой.

Особенность влияния отклонений от перпендикулярности торцовых поверхностей сопрягаемых деталей на биение в осевом направлении заключается в избирательном законе их суммирования. Согласно этому закону, из двух отклонений от перпендикулярности сопрягаемых торцов деталей на осевое биение влияет только наименьшая погрешность.

Как следует из рис. 1.6.36 при вращении вала, когда торец у корпуса не имеет отклонения от перпендикулярности к оси отверстия, колебание стрелки индикатора будет 0.

В случае отклонения торцов корпуса ω_k и вала ω_b от перпендикулярности при условии, что $\omega_k < \omega_b$, стрелка индикатора за оборот покажет величину отклонения, равную ω_k (рис. 1.6.36, б), а в третьем случае (рис. 1.6.36, в), когда $\omega_k > \omega_b$, стрелка индикатора покажет ω_b .

При наличии нескольких пар из вращающихся и невращающихся деталей (рис. 1.6.36, г), наибольшая суммарная погрешность осевого перемещения будет равна сумме наименьших отклонений от перпендикулярности поверхностей торцов сопрягаемых деталей в каждой паре. Так, осевое биение $\omega_{0,6} = \omega_1 + \omega_3 + \omega_5 + \omega_7$.

Другой погрешностью при сборке вращающихся деталей является радиальное биение центра сечения и пространственное биение оси детали.

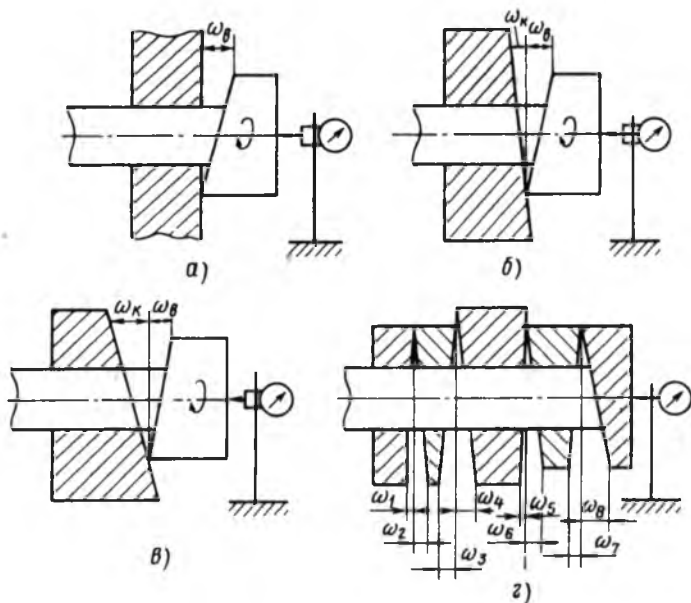


Рис. 1.6.36. Схемы образования осевого биения вращающейся детали при отклонении от перпендикулярности:

- а* – торца вала; *б* – стенки корпуса и торца вала при $\omega_k < \omega_g$;
в – стенки корпуса и торца вала при $\omega_k > \omega_g$; *г* – торцов колец, вала и стенок корпуса при $\omega_2 > \omega_1$, $\omega_4 > \omega_3$, $\omega_6 > \omega_5$, $\omega_8 > \omega_7$

Причинами радиального биения вращающихся деталей является наличие эксцентриситетов поверхностей вращения относительно осей вращения, а также наличие зазоров в опорах вращающихся деталей и погрешностей формы сопрягаемых поверхностей. Например, радиальное биение e посадочного отверстия шпинделя зависит от модулей эксцентриситетов e_n и e_3 в передней и задней опорах, а также их направлений (рис. 1.6.37).

Одним из важных показателей качества неподвижного соединения деталей в процессе сборки изделия является натяг, величина которого в значительной степени зависит от контактных деформаций. В результате контактных деформаций деформируются микровыступы и нижележащие слои материала. Поскольку фактическая площадь контакта сопрягаемых деталей даже после шлифования составляет в начальный момент 25...30 %

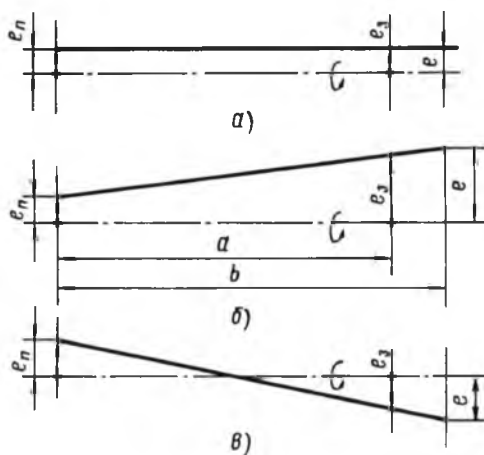


Рис. 1.6.37. Схемы образования радиального биения шпинделя:

а – при параллельном смещении оси шпинделя;

б – при повороте и смещении оси шпинделя; *в* – при пересечении оси шпинделя с осью посадочных отверстий в корпусе; сплошная линия – ось шпинделя

расчетной, давление в соединениях может существенно увеличиваться против номинального.

Если контактируют гладкая и шероховатая поверхности, то в начальный момент времени под действием в процессе сборки нагрузки деформируются наиболее выступающие микронеровности, а затем по мере роста нагрузки контактируют и другие выступы меньшей высоты. Если же контактируют две шероховатые поверхности, то в начальный момент сборки нагрузка деформирует противостоящие выступы, сумма высот которых оказывается наибольшей, а затем происходит деформирование и других пар выступов. Таким образом, контактные напряжения зависят от шероховатости сопрягаемых поверхностей деталей.

В процессе сборки неподвижных соединений тепловым методом происходит передача теплоты от нагретой охватывающей детали к охватываемой, в результате которой значение натяга будет во времени изменяться. По мере остывания охватывающей детали размер отверстия будет уменьшаться, а в результате передачи от нее теплоты к охватываемой детали последняя будет расширяться. При значительном превышении коэффициента линейного расширения охватываемой детали (особенно если охватываемая деталь – тонкостенная втулка) могут возникнуть оста-

точные деформации, что приведет к ослаблению натяга и искажению геометрической формы. Следует также учитывать, что при посадке нагретой детали до упора, после ее охлаждения в месте упора может образовываться зазор.

Кроме того, нагрев детали сложной формы может явиться причиной возникновения тепловых напряжений, местных деформаций, снижения твердости и окисления поверхности.

1.6.5. ОБРАЗОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЯ НА ПРОТЯЖЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

В практике машиностроения, как правило, не удается из предмета труда за один технологический переход получить готовую деталь и тем более изделие. Поэтому обычно изделие изготавливают за сравнительно большое число технологических переходов и операций.

Например, чтобы превратить заготовку в деталь заданной геометрии и точности, необходимо снять с заготовки лишний слой материала и преобразовать ее форму и размеры; преобразование будет происходить до тех пор, пока заготовка не приобретет форму и размеры, укладываемые в заданные допуски на готовую деталь.

Аналогично достигают других качественных характеристик готовой детали; и здесь задача тоже сводится к тому, чтобы исходные качественные характеристики заготовки преобразовать в характеристики готовой детали.

Указанный процесс преобразования можно осуществлять различными методами и средствами. Так, заготовку можно превратить в деталь при обработке резанием или методами физико-химической обработки.

При установлении связей между параметрами качества детали, получающимися по ходу технологического процесса, пользуются такими понятиями, как уточнение и передаточное отношение. Эти понятия отражают связь качества обработки, полученной на данной операции, с качеством обработки на предыдущей операции.

Под фактическим уточнением ε понимается отношение погрешности заготовки Ω_3 к погрешности детали Ω_d по данной геометрической характеристике (размерам линейному и угловому, форме):

$$\varepsilon = \Omega_3 / \Omega_d.$$

Передаточное отношение:

$$\xi = \Omega_d / \Omega_3.$$

Если с помощью уточнения характеризуют процесс уменьшения погрешности заготовки от одного технологического перехода к другому, то с помощью передаточного отношения – процесс переноса погрешности заготовки от перехода к переходу. После прохождения заготовкой каждой технологической системы ее размеры уточняются в соответствии с величиной ε и после m технологических переходов общее уточнение

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_m = \prod_{i=1}^m \varepsilon_i,$$

где ε_i – уточнение заготовки на i -м технологическом переходе.

Процесс наследования погрешности заготовки можно представить с помощью передаточного отношения

$$\xi = \xi_1 \xi_2 \dots \xi_m = \prod_{i=1}^m \xi_i,$$

где ξ_i – передаточное отношение на i -м технологическом переходе.

Для получения годной детали по выбранной геометрической характеристике необходимо, чтобы допуск

$$T_d \geq \Omega_3 / \varepsilon = \Omega_3 / \prod_{i=1}^m \varepsilon_i$$

или

$$T_d \geq \Omega_3 \xi = \Omega_3 \prod_{i=1}^m \xi_i,$$

где m – число технологических переходов.

Точность детали характеризуется точностью линейных и угловых размеров, геометрической формы поверхностей, поэтому по каждому показателю точности требуется определить ε или ξ .

Обычно значения передаточных отношений или уточнений по разным показателям различны. Это приводит к тому, что для получения заданной точности (например, линейного размера) необходима технологическая система с одним значением передаточного отношения, а для получения требуемой шероховатости – технологическая система с другим значением передаточного отношения.

Например, гладкие валы сначала обрабатывают на токарных и шлифовальных станках для получения требуемой точности размеров и фор-

мы, а затем на притирочных и суперфинишных станках – для получения требуемой шероховатости поверхности.

С тем, чтобы на практике можно было рассчитывать с требуемой достоверностью значения отклонений, надо знать закономерности переноса свойств предмета труда в процессе изготовления изделия, историю возникновения каждого отклонения.

Пути преобразования предмета труда в изделие различаются временными, трудовыми, материальными, энергетическими и стоимостными затратами. В задачу технолога входит разработка такого технологического процесса, который отличался бы наибольшей эффективностью. Чтобы разработать такой технологический процесс, технолог должен понимать не только закономерности формирования качества изделия на технологическом переходе, но и закономерности преобразования качества предмета труда на протяжении всего технологического процесса, уметь устанавливать связи между качественными характеристиками предыдущих и последующих технологических переходов.

Опыт показывает, что чем раньше по ходу технологического процесса заготовка приближается по своим качественным характеристикам к готовой детали, тем в конечном итоге экономичнее будет этот процесс. Отсюда желательно получать такую заготовку, качественные характеристики которой максимально приближались бы к качественным характеристикам готовой детали.

Различают понятия "технологическое наследование" и "технологическая наследственность" [14].

Технологическим наследованием называется явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим. Эти свойства могут быть как полезными, так и вредными. Сохранение же этих свойств у объектов называют *технологической наследственностью*. С их помощью можно проследить за состоянием объекта производства в любой момент времени с учетом всех предшествующих технологических воздействий. В процессе передачи свойств важную роль играет так называемая *наследственная информация* материала деталей и их поверхностных слоев. Информация представляет собой большой перечень показателей качества.

Существенным является установление общих закономерностей технологического наследования при изготовлении деталей и сборки изделий. Определяют количественную сторону технологического наследования таких параметров, как конструктивные формы заготовок и деталей, погрешности технологических баз, погрешности формы, пространственные

отклонения заготовки и деталей, волнистость, физико-механические свойства поверхностных слоев и др.

Носителями наследственной информации являются собственно материал детали, а также ее поверхности с многообразием параметров, описывающих состояние этих поверхностей. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через своего рода "барьеры", задерживаясь на них частично или полностью; одним из существенных "барьеров" являются термические операции.

Суть явления технологической наследственности рассмотрим на примере шлифования трех групп образцов, выполненных из подшипниковой стали. *Образцы первой группы* были предварительно проточены с большой подачей и имели шероховатость $Ra = 20$ мкм. *Образцы второй группы* были предварительно проточены с достижением $Ra = 5$ мкм, а *образцы третьей группы* – предварительно прошлифованы с получением $Ra = 0,32$ мкм. Эти три группы образцов были в одинаковых условиях закалены, а затем прошлифованы с получением $Ra = 0,32$ мкм. В итоге образцы трех групп получили одинаковые (в пределах допуска) размеры и одинаковую шероховатость.

Однако эксплуатация этих образцов-деталей в контакте с другими деталями в одинаковых условиях и через одно и то же время показала совершенно различное состояние поверхностей. На поверхности деталей, входящих в первую группу, образовалось большое количество глубоких раковин, у деталей второй группы этих раковин было значительно меньше, а у деталей третьей группы раковины отсутствовали полностью. *Следовательно, при одинаковых качественных показателях (размеры и шероховатость) служебные свойства деталей оказались различными, так как проявились свойства, полученные до проведения термической обработки.* Этому явлению должно быть дано разъяснение, так как на его основе возможно управление качеством деталей машин.

Шлифовальный круг 1 (рис. 1.6.38) своей цилиндрической поверхностью АВ в первую очередь срезает микровыступы заготовки 2; при этом возникают множественные локальные очаги теплового воздействия на поверхностный слой заготовки (стрелками условно показано перемещение теплоты). Своеобразные тепловые удары создаются в поверхностном слое зоны, где происходят фазовые превращения материала с изменением физико-механических характеристик (зоны условно заштрихованы вертикальными линиями), что объясняет возникновение раковин.

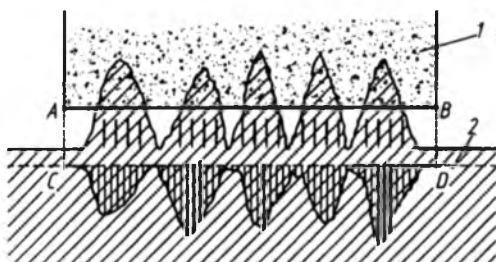


Рис. 1.6.38. Схема образования неоднородности поверхностного слоя при шлифовании

В ходе шлифования инструмент займет положение CD , однако неравномерность свойств отдельных зон поверхностного слоя останется и будет проявляться у готовой детали тем больше, чем больше было значение Ra у заготовки; так свойства заготовок наследуются на готовых деталях. Если установлена наследственная природа свойств деталей, то можно принять соответствующие коррективы при разработке технологических процессов для предотвращения наследственного переноса вредных свойств и, наоборот, создания благоприятных условий для передачи полезных свойств.

Рассмотрим *технологическое наследование* погрешностей геометрической формы технологических баз шлифования заготовок, установленных в центрах. Шлифование производится широким кругом. На заготовку

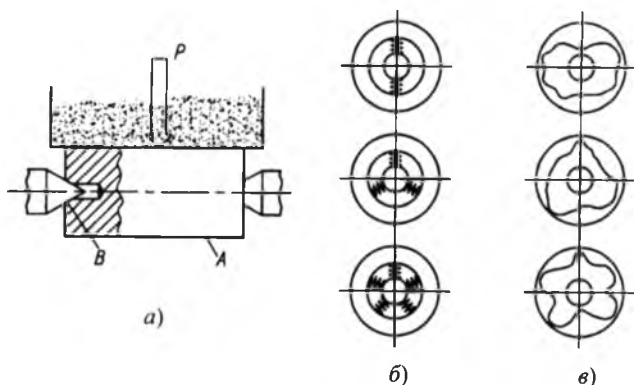


Рис. 1.6.39. Технологическое наследование погрешностей геометрической формы технологических баз при шлифовании

действует сила P (рис. 1.6.39, *а*); технологическими базами являются конические поверхности B центровых отверстий. В связи с особенностями изготовления центровых отверстий на их поверхностях возникает волнистость. Чаще всего наблюдается две, три или пять волн, что условно показано на рис. 1.6.39, *б*. При невращающихся центрах и постоянном направлении силы P жесткость системы "заготовка – центры" оказывается переменной, поэтому и упругое перемещение заготовки также будет переменным. На обрабатываемой поверхности A возникают отклонения формы (рис. 1.6.39, *в*). Число выступов и впадин на поверхности A точно соответствует числу волн на технологических базах. Так, погрешности технологических баз переносятся (наследуются) на обрабатываемую поверхность. Если производить не врезное, а круглое шлифование или установить на центры заготовку с различным числом волн на центровых отверстиях, процесс наследования окажется более сложным.

Решение проблемы технологического наследования всегда связано с отысканием таких условий, при соблюдении которых не возникает наследственного переноса вредных свойств от предшествующих операций к последующим. Рассмотрим процесс суперфиниширования. После бесцентрового шлифования заготовок на их наружной поверхности возникло 18 выступов (рис. 1.6.40, *а*). Для удаления такой погрешности формы и достижения заданной шероховатости заготовки подвергали суперфинишированию тремя абразивами. Постоянно отклонение формы уменьшалось, что можно наблюдать по круглограммам, снятым с заготовок через каждые 4 с; спустя 20 с со станка снимают качественные детали. Однако если заготовки имеют после предварительной обработки три выступа (рис. 1.6.40, *б*), то при тех же условиях проведения процесса суперфиниширования погрешность формы увеличивается, что можно видеть из анализа круглограмм. Чтобы не возникало ухудшения формы и были ликвидированы наследственные погрешности, полученные на предшествующей операции, необходимо знать и использовать математические зависимости, полученные на основе закономерностей технологического наследования. Например, в данном случае они позволят определить требуемое число брусков абразива и закон относительного движения.

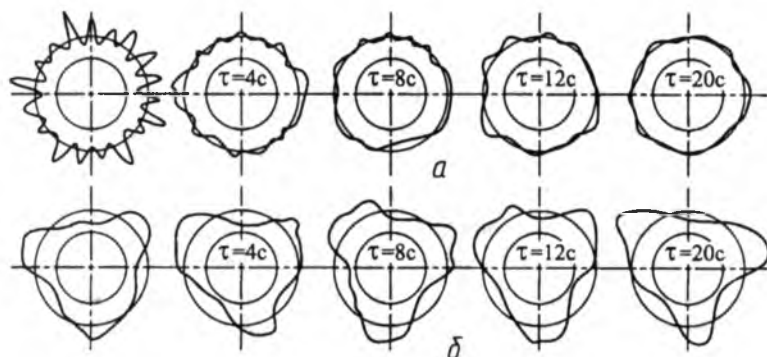


Рис. 1.6.40. Круглограммы поперечного сечения деталей после суперфиниширования

Важно установить не только качественные, но и количественные характеристики технологического наследования. Именно количественные характеристики позволяют определить, насколько велико влияние технологического наследования на достижение данного свойства детали в процессе ее изготовления.

Вопрос о необходимости учета явления технологического наследования надо решать в каждом конкретном случае на основе степени влияния наследуемого свойства на характеристики детали.

1.6.6. ОБРАЗОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ

Вопросы измерения точности детали играют чрезвычайно важную роль в достижении заданной точности как детали, так и изделия в целом в процессе изготовления. Ошибки в измерении погрешностей изготовленного изделия могут иметь существенные негативные последствия. Например, неправильная оценка погрешности обработки детали приводит к статической и динамической погрешностям настройки технологической системы, неправильному назначению допусков на межпереходные размеры и т.д.

Проблема оценки точности изделия с точки зрения соответствия его служебному назначению является комплексной, когда должен учиты-

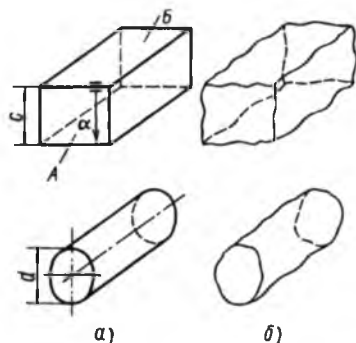


Рис. 1.6.41. Детали с идеальными поверхностями (а) и реальными поверхностями (б)

ваться целый набор его характеристик с учетом их взаимосвязей. Вопрос этой очень сложен, недостаточно изучен и разработан, в связи с чем не представляется возможным дать его полное изложение.

Учитывая все же большую важность и актуальность проблемы в связи с непрерывным ростом требований к качеству изделий, рассмотрим на примере геометрической точности детали задачи, с которыми приходится сталкиваться при ее измерении.

Главной причиной, порождающей основные трудности в измерении геометрической точности изделия, является отличие формы реальных поверхностей от заданных на чертеже их геометрических прототипов. При конструировании машины, механизма, детали конструктор оперирует образами идеальных поверхностей и их сочетанием. Под идеальными поверхностями понимаются поверхности, заданные конструктором, например, плоскость, круговой цилиндр, винтовая поверхность и т.п. Однако у реальных деталей форма поверхности всегда отличается от заданной конструктором, это и приводит к трудностям в измерении точности. В качестве примера на рис. 1.6.41 показаны детали с идеальными (рис. 1.6.41, а) и реальными (рис. 1.6.41, б) поверхностями. Когда поверхности соответствуют заданным геометрическим образам, то легко, например, измерить расстояние c , диаметральный размер d , отклонение от параллельности α . У деталей с реальными поверхностями возникает проблема определения этих характеристик.

Отклонение формы реальных поверхностей от заданных привело к введению дополнительных геометрических характеристик, таких как отклонения от плоскостности, прямолинейности, цилиндричности, круглости (элементами которой являются овальность, огранка), откло-

нение профиля в продольном сечении (конусообразность, бочкообразность, седлообразность, изогнутость) и др.

Введение этих характеристик усложнило методику измерения за счет таких дополнительных этапов, как определение положения базы отсчета и выбора критерия отклонения данной геометрической характеристики. Например, чтобы определить отклонение от параллельности поверхности *Б* относительно поверхности *А* (см. рис. 1.6.41), надо провести прилегающие плоскости к каждой из этих поверхностей.

Другой причиной повышенной трудоемкости процесса измерения точности машины является наличие многочисленных геометрических характеристик, отклонения которых надо измерять. К ним относятся отклонение от параллельности, биение, отклонение от перпендикулярности, перекос осей, отклонения от соосности, симметричности, перекрещивания осей и др.

В зависимости от типа контролируемого изделия появляются дополнительные геометрические характеристики, учитывающие его специфику. Например, при контроле точности зубчатого колеса измеряют погрешности шага между зубьями, накопленную ошибку шага, толщину зуба и его направление. При этом каждая из геометрических характеристик требует своего метода и средств измерения.

Наличие такого многообразия геометрических характеристик привело к появлению множества методов и средств измерения, и тем самым повысило трудоемкость и стоимость измерений. Поэтому одной из важнейших задач совершенствования процесса измерения является унификация геометрических характеристик. Сокращение разнообразия геометрических характеристик позволит существенно повысить точность и эффективность процесса измерения.

Большой резерв в повышении эффективности и качества процесса измерения точности машин заложен в совершенствовании методов измерения. В ряде случаев наблюдается такой парадокс, когда преимущества высокоточных измерительных средств "сводятся на нет" недостатками методов измерения, т.е. погрешности измерения, вносимые методикой измерения, оказываются значительно выше погрешностей средств измерения. Одной из главных причин такого несоответствия является многоступенчатость процесса измерения, что приводит к накоплению погрешностей.

Все разнообразие методов измерения точности деталей и машин можно свести к двум принципиально отличным видам: комплексному и дифференцированному.

Сущность *комплексного метода* заключается в получении непосредственно в результате измерения ответа о годности или непригодности контролируемого объекта выполнять свои служебные функции (типичным примером такого метода является измерение с помощью проходного и непроходного калибров). Кроме того, в процессе измерения непосредственно можно контролировать и показатели служебного назначения объекта (например, при контроле плунжерной пары измеряют объем утечки рабочей среды за единицу времени и таким образом определяют годность этой плунжерной пары).

Преимуществом комплексного метода является возможность установления непосредственной связи между геометрией измеряемого объекта и его служебными функциями, а также отсутствие необходимости измерения многочисленных геометрических характеристик.

Таким образом, с точки зрения объема измерений, а следовательно, и потенциально меньшей погрешности измерения комплексный метод более предпочтителен. Однако его применение наталкивается на ряд таких трудностей, как недостаточное знание явлений, которые имеют место при выполнении изделием служебных функций. Другим недостатком комплексного метода является отсутствие информации об отклонениях геометрических характеристик, что затрудняет совершенствование технологии изготовления изделия и восстановление точности, теряемой в процессе эксплуатации.

В связи с указанными недостатками комплексного метода широкое распространение приобрел *дифференцированный метод*, сущность которого заключается в измерении отклонений группы геометрических характеристик.

Рассмотрим в качестве примера контроль точности вала. Точность детали оценивается комплексом показателей: точностью размера или расстояния между поверхностями, точностью относительных поворотов поверхностей и точностью геометрической формы поверхностей.

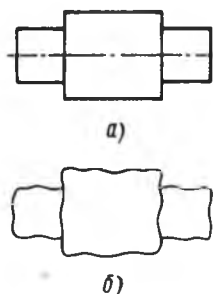


Рис. 1.6.42. Ступенчатый вал с поверхностями:

a – идеальными;
б – реальными

Упрощая задачу, рассмотрим только измерение точности вала в поперечном сечении. Для решения этой задачи надо измерить сначала погрешность формы диаметрального размера, а затем положение контролируемого сечения относительно опорных шеек вала (рис. 1.6.42).

В свою очередь, чтобы определить указанные погрешности, необходимо у реального вала (рис. 1.6.42, *б*) найти базы отсчета положения контролируемого сечения относительно опорных шеек. В качестве таких баз (согласно ГОСТ 24642–81) примем оси этих шеек, а в качестве характери-

стики, определяющей погрешность положения поперечного сечения, радиальное биение.

Исходной информацией для определения точности поперечного сечения вала являются результаты измерения фактических поверхностей опорных шеек и профиля контролируемого поперечного сечения. Поскольку поверхность шейки вала можно представить совокупностью профилей поперечного сечения, то для получения исходной информации надо определить *n* профилей поперечных сечений. Измерение точности профиля поперечного сечения осуществляют в несколько этапов.

Этап 1 – измерение профиля поперечного сечения вала, которое осуществляется различными способами. Наибольшее распространение на практике нашли три способа: двухконтактный, трехконтактный и измерение радиус-вектора (метод образцового вращения).

Двухконтактный способ измерения профиля детали заключается в измерении диаметрального размера сечения в разных направлениях. Под диаметральным размером профиля произвольной формы, отличающегося от окружности, понимается расстояние, заключенное между точками касания профиля с двумя параллельными прямыми. В общем случае диаметральные размеры не пересекаются в одной точке (рис. 1.6.43, *а*), поэтому по колебанию диаметрального размера нельзя судить о форме профиля детали. Например, в математике известна группа фигур, имеющих постоянную ширину, которые, резко отличаясь по форме, характерны

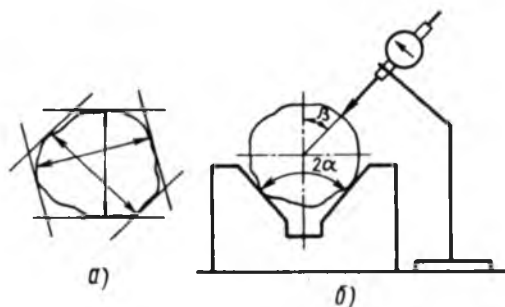


Рис. 1.6.43. Измерение профиля поперечного сечения:
а – двухконтактным методом; *б* – трехконтактным методом

тем, что две любые параллельные опорные прямые удалены одна от другой на одно и то же постоянное для всех направлений расстояние. Примером такой фигуры является огранка с нечетным числом граней. Следовательно, при высоких требованиях к точности формы этот способ для измерения профиля не рекомендуется.

Трехконтактный способ измерения профиля детали обычно реализуется в виде измерения детали на призме (рис. 1.6.43, б). Результаты показаний измерительного прибора при таком способе измерения зависят от формы измеряемого сечения, угла призмы 2α и угла β , заключенного между биссектрисой угла и направлением измерения. Для определения по результатам измерений действительного профиля детали разработаны коэффициенты воспроизведения, определяющие связь между показаниями измерительного прибора и действительного профиля. Значения коэффициентов зависят от углов α и β и формы детали (рассматриваемой как сочетание гармоник, полученных после разложения уравнения профиля в ряд Фурье). Следует отметить, что углы α и β определяют, какие номера гармоник будут обнаружены при таком сочетании параметров измерения, а на какие прибор не будет реагировать.

Таким образом, чтобы выявить трехконтактным методом все составляющие гармоники профиля детали и определить действительный профиль детали, необходимо производить измерения детали при различных комбинациях значений углов α и β с последующим пересчетом. Такой способ трудоемок и не отличается высокой точностью. Определение

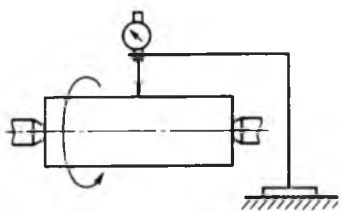


Рис. 1.6.44. Измерение радиус-вектора профиля поперечного сечения

формы детали путем измерения радиус-вектора (рис. 1.6.44) осуществляется при относительном вращении детали и измерительного устройства. В этом случае на точности измерения не сказывается характер измеряемой формы профиля, как это имело место в ранее рассмотренных способах. Однако схемы измерения, реализующие этот способ, вносят существенные погрешности.

Широко распространенной схемой измерения является измерение радиус-вектора детали при вращении ее в центрах. Измерительное устройство по такой схеме показывает отклонение от заданной величины, определяемое колебанием радиус-вектора профиля, смещением профиля относительно центров и отклонением от вращательного движения. Другие схемы измерения радиус-вектора, например, когда вращается измерительное устройство или деталь, имеют тот же недостаток – на погрешность измерения влияет отклонение от вращательного движения. Отсюда следует, что по радиальному биению нельзя судить о форме детали. Например, деталь имеет в сечении окружность, но так как невозможно без погрешности совместить центр окружности с центрами, то при измерении будет иметь место отклонение радиус-вектора, хотя в действительности погрешность формы отсутствует. Нередко и неточность вращательного движения познают (без каких-либо дополнительных пересчетов) через радиальное биение. Это приводит к неправильной оценке отклонения действительного движения от заданного. Возможен даже такой случай, когда неточность вращательного движения в сумме с погрешностью формы из-за разных знаков погрешности приведет к тому, что измерение покажет отсутствие радиального биения.

Допуская, что деталь совершает вращательное движение, идеализируют явление и вводят такие понятия, как ось вращения, центр вращения, принимаемые во многих случаях в качестве измерительных баз, что приводит при измерении высокоточных деталей к серьезным ошибкам. В действительности фактическое движение детали является сложным, а не вращательным. Указанное допущение объясняется тем, что ранее в

подавляющем большинстве случаев при обработке деталей на станках точность формы получалась на один-два порядка выше точности размера. Это и вызвало подмену на практике понятия сложного движения вращательным и, как следствие, выбор в качестве измерительных баз осей или центров вращения. В случае измерения высокоточных деталей указанного разрыва уже нет, и рассмотренные выше допущения становятся тормозом в достижении требуемой точности деталей.

Из рассмотренных выше способов измерения профиля поперечного сечения деталей предпочтительным является способ, основанный на измерении радиус-вектора профиля. Основной причиной, снижающей точность измерения по этому способу, является отклонение фактического движения детали от вращательного. Для сокращения этой погрешности следует не только совершенствовать конструкции известных приборов, но и разрабатывать принципиально новые методы и средства измерения.

Этап 2 – отображение результатов измерения профиля детали. После измерения профиля сечения для определения его погрешностей нужно в той или иной форме представить результаты измерения. Их можно изобразить в табличной или графической форме. Последняя более наглядна и позволяет визуально оценить отклонения профиля. Кроме того, при графическом способе легче анализировать характер погрешности, что особенно важно при анализе причин, порождающих погрешность.

На практике наибольшее распространение нашло отображение формы круглых деталей в виде круглограммы или развертки. Круглограмма может быть построена по значениям модуля радиус-вектора или по отклонениям модуля радиус-вектора. Последний случай наиболее распространен из-за малой площади занимаемой круглограммы.

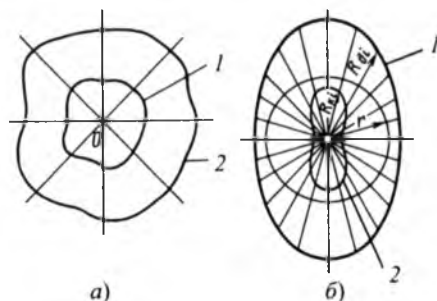


Рис. 1.6.45. Построение круглограммы:

а – по абсолютным значениям радиус-вектора; *б* – по отклонениям радиус-вектора; *1* – кривые профиля; *2* – кривые круглограммы

Сущность построения круглограммы по величинам радиус-вектора заключается в следующем. Пусть задана замкнутая кривая, являющаяся профилем (рис. 1.6.45, *а*). Необходимо построить круглограмму этой кривой большего масштаба. Тогда в области, ограниченной кривой, произвольно выбирают центр O и из него проводят лучи, на которых откладывают значения модуля радиус-вектора в требуемом масштабе, в результате получаем фигуру, подобную замкнутой кривой. Условие подобия обеспечивается тем, что каждый радиус круглограммы равен произведению радиуса детали на этом же луче на один и тот же масштабный коэффициент K_m .

К недостаткам этого способа отображения формы детали относится необходимость большой площади для построения круглограммы при незначительном увеличении, поэтому этот способ не нашел широкого применения на практике.

При построении круглограммы по отклонениям модуля радиус-вектора масштабный коэффициент умножается на значение отклонения модуля радиуса за вычетом постоянной величины (рис. 1.6.45, *б*). При таком методе построения круглограммы нарушается условие подобия. Действительно, радиус круглограммы на i -м луче

$$R_{ki} = (R_d - r) K_m, \quad (1.6.10)$$

где R_d – радиус детали в i -м направлении; r – радиус окружности, вписанной в профиль; K_m – масштабный коэффициент.

Поскольку из каждого радиуса детали, отличающегося друг от друга, вычитается постоянная величина, а не величина, пропорциональная каждому радиусу, происходит нарушение условия подобия, что приводит к отличию профиля, записанного в виде круглограммы, от фактического. Приращение радиуса круглограммы, обусловленное нарушением условия подобия, определяется из равенства

$$\Delta R_i = K_m r \left(\frac{R_{di}}{R_{d1}} - 1 \right). \quad (1.6.11)$$

Из (1.6.10) следует, что отклонение радиуса круглограммы от радиуса, соответствующего условию подобия, тем больше, чем больше K_m , r и чем больше отношение R_{di} / R_{d1} отличается от единицы. Формула (1.6.10) показывает, что если записать две круглограммы одного и того же про-

филя, но от разных центров профиля, то круглограммы будут иметь разную форму. Действительно, согласно формуле (1.6.10), при различных центрах отсчета радиуса отношение $R_{дi}/R_{д1}$ будет различным, следовательно, и ошибки радиусов круглограммы, вызванные нарушением условия подобия, будут отличаться друг от друга.

Изложенное можно проиллюстрировать на следующем примере. Возьмем профиль, имеющий в сечении окружность (рис. 1.6.46). Если построить круглограмму из центра, совпадающего с центром окружности, то отношение $R_{дi}/R_{д1} = \text{const}$, отсюда и $\Delta R_i = \text{const}$, поэтому на круглограмме будет тоже окружность (рис. 1.6.46, а).

При смещении центров ($R_{дi}/R_{д1} \neq \text{const}$), приняв за $R_{д1}$ наименьший радиус $R_{д1} = R_0 - e$, где R_0 – радиус окружности детали; e – эксцентриситет, получим, что $R_{дi}/R_{д1}$ будет изменяться при изменении направления луча, что приведет к нарушению условия подобия, и профиль круглограммы будет отличаться от окружности (рис. 1.6.46, б).

Такие измерения были приведены на кругломере мод. 218 Московского инструментального завода "Калибр". На измерительный стол установили сферу-эталон. Сначала произвели центрирование ее относительно измерительного шпинделя с высокой точностью (стрелка, указывающая точность центрирования, была практически неподвижна), затем была произведена запись круглограммы, которая почти не отличалась от окружности; эталон сдвинули и опять сцентрировали, но с низкой точностью (стрелка колебалась в пределах шкалы центрирования), опять записали круглограмму, которая уже значительно отличалась от окружности и была близка по форме к круглограмме, изображенной на рис. 1.6.46, б.

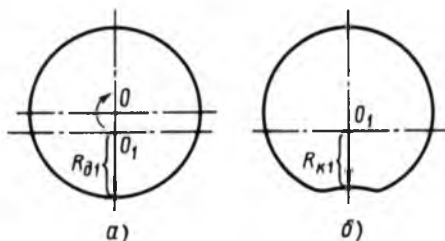


Рис. 1.6.46. Круглограммы окружности:

а – при совпадении центров окружности и круглограммы;
б – при несовпадении центров окружности и круглограммы

Аналогичные результаты были получены и при измерении на кругломере "Talyrond" (Великобритания) (в обоих случаях на круглограммах получили фигуру типа улитки Паскаля).

Таким образом, при отображении профиля с помощью круглограммы, построенной по отклонениям модуля радиус-вектора, надо помнить, что форма профиля детали может отличаться от формы профиля, записанного на круглограмме. На практике такое явление называют масштабным эффектом.

Отображение формы детали в виде развертки осуществляется следующим образом. При вращении детали с постоянной угловой скоростью измерительное устройство измеряет радиус детали относительно выбранного центра отсчета (обычно он совпадает с центром вращения) и через соответствующий механизм наносит на бумаге, движущейся поступательно со скоростью v , линию изменения радиуса в определенном масштабе. При этом должно соблюдаться постоянство отношения ω/v . В зависимости от изменения отношения ω/v запись кривой будет растянута или сжата. В общем случае зависимость радиуса от угла поворота в прямоугольных координатах:

$$R_p = K_m [R_{d\min} + \Delta R_d(\varphi)], \quad (1.6.12)$$

где R_p – ордината развертки; $R_{d\min}$ – минимальный радиус детали относительно выбранного центра отсчета; $\Delta R_d(\varphi)$ – отклонение радиуса детали от минимального значения в функции угла поворота.

Из (1.6.11) следует, что при изменении масштабного коэффициента K_m будет изменяться радиус развертки не только из-за колебания радиуса детали, но и из-за $R_{d\min}$, т.е. график $R_p - f(\varphi)$ не только изменится по амплитуде, но и сместится по оси ординат. Условие подобия при таком способе отображения формы детали не нарушается, поскольку каждое значение радиуса R_d , для соответствующего угла φ , умножается на один и тот же коэффициент K_m , а площадь, необходимая для ее отображения, при значительном увеличении сравнительно невелика.

Аналогичным образом фиксируют результаты измерения профиля и в поперечных сечениях опорных шеек, относительно которых задано положение контролируемого сечения. В итоге получили исходную информацию, необходимую для оценки геометрических погрешностей детали, т.е. для определения погрешности детали.

Рекомендуют измерять погрешности геометрических характеристик в следующей последовательности: погрешность геометрической формы поверхностей (микроотклонения, волнистость, макроотклонения), погрешность относительных поворотов поверхностей; погрешность размера или расстояния.

В рассматриваемом случае требуется определить отклонение от круглости профиля поперечного сечения вала, отклонение его положения относительно опорных шеек и отклонение диаметрального размера.

Этап 3 – измерение отклонения от круглости профиля поперечного сечения вала. Чтобы измерить отклонение от круглости, надо прежде всего определить базу отсчета. В качестве базы отсчета принимается геометрический прототип, заданный конструктором; в рассматриваемом случае это будет окружность.

При построении базовой окружности требуется найти положение ее центра относительно измеренного профиля. Поскольку реальный профиль имеет вид замкнутой кривой произвольной формы, то отклонение от круглости будет зависеть от положения центра базовой окружности. В соответствии с этим очень важное значение приобретает разработка правил определения положения центра базовой окружности и ее диаметра.

Наибольшее распространение нашли три методики построения базы отсчета отклонения от круглости профиля. ГОСТ 24642–81 предлагает в качестве базы отсчета отклонения от круглости пользоваться прилегающей окружностью. При этом под прилегающей окружностью понимается окружность минимального диаметра, описанная вокруг реального профиля наружной поверхности вращения, или максимального диаметра, вписанная в реальный профиль внутренней поверхности вращения.

В стандартах других стран в качестве базы отсчета принимается или средняя окружность, или две концентричные окружности. Средняя окружность проводится таким образом, чтобы сумма квадратов расстояний от нее до точек профиля, измеренных по достаточно большому числу равномерно расположенных и радиально направленных отрезков, являлась минимальной.

При отсчете погрешности формы от прилегающей и средней окружностей принимается максимальное отклонение точек профиля от окружности в радиальном направлении. Когда оценка отклонения от круглости производится с помощью двух концентричных окружностей, они проводятся так, чтобы одна из них была вписанной, а другая – описанной, при-

чем принимается за базу такая пара окружностей (в общем случае может быть несколько пар концентричных окружностей), у которой расстояние в радиальном направлении между окружностями минимально.

Определение отклонения от круглости по этим трем методикам у одной и той же детали дает разный результат.

Главным недостатком рассмотренных выше методик отсчета погрешности формы является их использование независимо от служебного назначения контролируемой детали. Между тем детали одной и той же заданной формы могут быть предназначены для выполнения различных служебных функций. Например, вал может выполнять роль плунжера, шпинделя или неподвижной оси. Отсюда следует, что методика отсчета погрешностей формы должна выбираться с учетом служебного назначения детали. Причем речь идет не только о правилах построения базовой окружности, но и о выборе критерия оценки погрешности. Если, к примеру, профиль опорной шейки можно оценить по максимальному отклонению точек профиля от окружности, то для плунжера нужна оценка по площади отклонения, так как от ее величины зависит объем утечки рабочей среды.

В связи с этим представляет большой теоретический и практический интерес разработка методик определения погрешностей формы в зависимости от служебного назначения контролируемой детали.

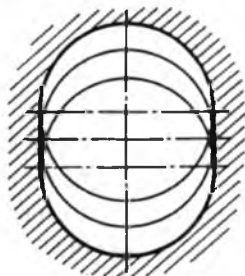


Рис. 1.6.47. Профиль поперечного сечения детали с несколькими прилегающими вписанными окружностями максимального диаметра

Недостатком методики отсчета погрешности формы от прилегающей окружности является неоднозначность решения. Если воспользоваться правилом определения прилегающей окружности, линии, плоскости, приведенные в ГОСТ 24692–81, то можно получить неоднозначный ответ, когда относительно одного и того же профиля поверхности детали может быть построено несколько прилегающих окружностей, линий, плоскостей. В качестве примера на рис. 1.6.47 показана фигура, в которую можно вписать множество прилегающих окружностей одного и того же максимального диаметра.

После определения базы отсчета производится определение отклонения от круглости, которое осуществляется непосредственным ее измерением или расчетом.

Например, измерение отклонения от круглости от прилегающей окружности осуществляется следующим образом. После записи круглограммы на последнюю накладывают прозрачный шаблон с нанесенными концентрическими окружностями, находят прилегающую окружность и определяют максимальное отклонение точки профиля круглограммы от прилегающей окружности; затем для определения погрешностей формы найденную величину делят на масштабный коэффициент. В других случаях к кругломерам прилагаются специальные вычислительные приставки, которые по результатам измерения рассчитывают погрешность формы.

После измерения погрешности формы переходят к измерению погрешности диаметрального размера профиля поперечного сечения вала.

Этап 4 – определение отклонения диаметрального размера поперечного сечения вала. Традиционно диаметральный размер измеряют как расстояние между двумя параллельными прямыми. Поворачивая деталь, производят несколько таких измерений и судят о их величинах по максимальному значению или принимают во внимание какое-то среднее значение от измеренных величин. Как видим, отсутствует: строгость в определении диаметрального размера, связь между служебным назначением детали и методикой определения диаметрального размера, связь между диаметром и формой профиля.

Этот вопрос практически не разработан, что существенно снижает точность измерения погрешности детали. Поэтому при определении погрешности диаметрального размера надо в первую очередь решить, что принимать за диаметр профиля произвольной формы; возможно, за диаметральный размер следует принимать диаметральный размер окружности, выступающей в качестве базы отсчета.

Следующим шагом должно быть измерение положения контролируемого профиля поперечного сечения.

Этап 5 – определение положения профиля поперечного сечения относительно опорных шеек вала.

Если подходить к решению этой задачи строго, то следует сформулировать критерии оценки погрешности относительного положения профиля произвольной формы, выбрать базу отсчета, определить правила ее

положения аналогично тому, как определяется погрешность формы поперечного сечения.

Если в качестве базы отсчета принять ось вращения, то надо определить центры вращения опорных шеек, провести через них ось вращения и относительно нее определять отклонение положения конструируемого профиля поперечного сечения вала.

На практике контроль относительного положения профиля часто осуществляется посредством измерения радиального биения. С этой целью деталь устанавливают опорными шейками в измерительном приборе и по схеме измерения радиус-вектора определяют радиальное биение как разность A наибольшего и наименьшего расстояний от точек реального профиля поверхности вращения до базовой оси в сечении плоскостью, перпендикулярной базовой оси.

Поскольку в качестве базовой оси используют оси опорных шеек, имеющих в свою очередь погрешность формы, постольку появится дополнительная погрешность измерения, обусловленная неточностью вращения.

Из приведенного примера можно сделать следующие выводы.

1. К основным причинам, снижающим качество и эффективность процесса измерения точности машины и деталей, относятся:

- многоступенчатость процесса измерения, приводящая к существенному накоплению погрешностей измерения;
- многочисленность и разнообразие геометрических характеристик, требующих контроля;
- отсутствие строгих связей между отклонениями геометрических характеристик;
- отсутствие связей между методиками их определения со служебным назначением контролируемого объекта.

2. Устранение указанных недостатков должно вестись в направлении математического описания процесса измерения, который сведется только к измерению поверхностей контролируемого объекта, унификации геометрических характеристик, что значительно снизит объем измерений и существенно уменьшит разнообразие методов и средств измерения, а также в установлении функциональных связей между отклонениями геометрических характеристик и служебным назначением изделия, установлении связей между геометрическими характеристиками контролируемого объекта.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите процессы, действующие в технологической системе во время ее работы.
2. За счет чего в технологической системе снижается влияние действующих факторов на погрешность изготовления?
3. Изобразите схему действующих факторов на погрешность обработки.
4. Что такое упругие перемещения в технологической системе и чем они отличаются от упругих деформаций ее деталей?
5. Что такое натяг в технологической системе?
6. Что такое жесткость и податливость технологической системы и их размерность?
7. Может ли быть жесткость отрицательной величиной?
8. Чем тепловые перемещения в технологической системе отличаются от тепловых деформаций ее деталей?
9. Какие колебания возникают в технологической системе?
10. Чем вызывается износ элементов технологической системы?
11. Что такое остаточные напряжения в детали и причины их образований?
12. В чем разница между напряжениями 1-го, 2-го и 3-го рода?
13. Объясните схему образования погрешностей обработки детали, вызванных упругими погрешностями переднего и заднего центров токарного станка.
14. Как влияет сила от одностороннего поводка на погрешность токарной обработки вала?
15. Как влияет центробежная сила на погрешность токарной обработки вала?
16. По какому закону изменяются тепловые перемещения в технологической системе во время ее нагрева и охлаждения?
17. На какие периоды делится кривая размерного износа резца во времени?
18. В чем разница между размерным износом и затуплением резца?
19. Как влияют остаточные напряжения на точность изготовления детали?
20. Какие основные факторы влияют на шероховатость обработанной поверхности?

21. Что такое качество поверхностного слоя и чем оно характеризуется?
22. Как влияет силовой фактор на качество поверхностного слоя?
23. Как влияет тепловой фактор на качество поверхностного слоя?
24. Из каких погрешностей складывается погрешность настройки технологической системы?
25. Что такое погрешность установки?
26. Относительно каких поверхностей определяются положения заготовки и инструмента в технологической системе?
27. Что такое погрешность статической настройки технологической системы и какие ее причины?
28. Что такое погрешность динамической настройки технологической системы и какие ее причины?
29. Привести пример влияния низкой жесткости деталей на точность сборки изделия.
30. В чем заключается избирательность закона суммирования отклонений торцов вращающихся деталей от перпендикулярности?
31. Какие факторы влияют на величину натяга сопрягаемых деталей?
32. В чем разница между понятиями уточнение и передаточное отношение и формулы их определения?
33. В чем разница между понятиями технологическая наследственность и технологическое наследование?
34. Как сказывается отличие формы реальных поверхностей деталей от заданных чертежом на методику измерения погрешности детали?
35. В чем разница комплексной и дифференцированной оценки погрешности деталей?
36. Перечислите этапы измерения точности поперечного сечения вала.
37. Три метода измерения профиля поперечного сечения детали типа тела вращения, их достоинства и недостатки.
38. Почему кривые круглограммы, построенные по отклонениям радиус-вектора, не соответствуют профилю сечения детали?
39. Что принимается за базу отсчета отклонения от круглости поперечного сечения детали?

Глава 1.7

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ И СЕБЕСТОИМОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ

Любой технологический процесс характеризуется затратами времени, труда, материалов, энергии. Знание закономерностей формирования указанных затрат позволяет технологу находить пути их снижения и проектировать эффективные технологические процессы.

1.7.1. ЗАТРАТЫ ВРЕМЕНИ НА ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Технологический процесс, как правило, состоит из нескольких операций и время на его осуществление складывается из времени, затрачиваемого на операции, плюс время на перемещения предмета труда (заготовки, детали, сборочной единицы) от одной технологической системы к другой с учетом его пролеживания.

Рассмотрим формирование затрат времени на операцию, представляющие собой сумму затрат времени на рабочий и вспомогательный процессы. Любой процесс, в том числе рабочий или вспомогательный, — это движение материальных объектов с соответствующей скоростью. Отсюда затраты времени на процесс являются функцией пути и скорости. Например, при обработке заготовки на станке время, затрачиваемое непосредственно на съем материала, зависит от длины рабочего хода режущего инструмента относительно заготовки, а также от скорости относительного движения, выраженной через скорость резания и скорость подачи. При сборке изделия, например соединения "вал-втулка", время непосредственного соединения этих деталей будет зависеть от длины сопряжения и скорости относительного движения вала и втулки.

Длина рабочего хода определяется геометрическими характеристиками заготовки и принятым методом обработки.

Скорость рабочего движения зависит от технических возможностей технологической системы и технологических требований. К техническим ограничениям технологической системы относятся мощность привода, скорость двигателя, прочность, жесткость, виброустойчивость данной системы.

К технологическим ограничениям относятся требования к качеству изготовления изделия, а именно: требования к геометрической точности, качеству поверхностного слоя, прочности соединения. Например, при обработке заготовки с увеличением скорости подачи растет шероховатость обработанной поверхности, увеличиваются силы резания, которые вызывают рост упругих перемещений элементов технологической системы и, как следствие, увеличение геометрических погрешностей.

Время рабочего процесса, затрачиваемое на изменение качества заготовки, называется *основным технологическим временем* $t_{от}$. Если рабочий процесс осуществляется без непосредственного участия человека, то это время называют машинным. Если рабочий процесс осуществляется с участием человека, то основное технологическое время называют ручным; при частичном участии человека – машинно-ручным. Основное технологическое время ($t_{от}$) зависит от выбранного метода обработки и рабочего инструмента. Формулы расчета $t_{от}$ в зависимости от метода обработки имеют разный вид, например:

$$\text{точение} \quad t_{от} = li / nS_0 ;$$

$$\text{строгание} \quad t_{от} = \frac{(b + b_1 + b_2) i}{n_{2x} S_{2x}} ;$$

$$\text{фрезерование} \quad t_{от} = li / S_z z n_{ф} ;$$

$$\text{шлифование} \quad t_{от} = \frac{a}{n_d S_{поп}} k ;$$

$$\text{протягивание} \quad t_{от} = \frac{L + l}{1000} (1 / v_p + 1 / v_{ок}) ;$$

$$\text{хонингование} \quad t_{от} = a / S_p n_{2x} ,$$

где l – расчетная длина пути режущего инструмента, мм; i – число ходов; n – частота вращения шпинделя, мин^{-1} ; S_0 – подача на оборот шпинделя, мм; b – ширина строганной поверхности, мм; b_1 – размер врезания лезвия; b_2 – размер выхода лезвия; n_{2x} – число двойных ходов стола (инструмента) в минуту; S_{2x} – подача на двойной ход, мм; S_z – подача на зуб фрезы, мм; z – число зубьев фрезы; $n_{ф}$ – частота вращения фрезы, мин^{-1} ; a – припуск на сторону, мм; n_d – частота вращения детали, мин^{-1} ; k – ко-

эffiциент, характеризующий точность шлифования; $S_{\text{поп}}$ – поперечная подача, мм/ход; L – длина рабочей части протяжки, мм; v_p – скорость резания, м/мин; $v_{\text{ох}}$ – скорость обратного хода, м/мин; S_p – радиальная подача на один двойной ход хонинговальной головки.

Для осуществления рабочего процесса необходимо проведение различного рода технических и организационных мероприятий.

Например, при осуществлении сборочного процесса или процесса обработки требуется обеспечить предварительное относительное положение деталей или сборочных единиц, произвести различного рода измерения, подвести или отвести инструмент, установить режимы рабочего процесса, включить и выключить двигатель и т.п. Время, затрачиваемое на осуществление перечисленных процессов, получило название *вспомогательного времени* $t_{\text{вс}}$.

Затраты времени на всю операцию оценивают по штучно-калькуляционному времени

$$t_{\text{шт к}} = T_{\text{пз}} / n + (t_{\text{от}} + t_{\text{вс}} + t_{\text{об}} + t_{\text{п}}), \quad (1.7.1)$$

где n – количество предметов труда в партии; $T_{\text{пз}}$ – подготовительно-заключительное время; $t_{\text{об}}$ – время обслуживания рабочего места; $t_{\text{п}}$ – время перерывов и отдыха.

Подготовительно-заключительное время затрачивается на приемы, производимые один раз на всю партию собираемых сборочных единиц или обрабатываемых заготовок. Это время затрачивается на ознакомление с чертежом и технологическим процессом, подготовку рабочего места, оборудования, приспособления и инструмента, приведение технологической системы в порядок после окончания работы, настройку технологической системы и др.

Время обслуживания рабочего места затрачивается на уход за рабочим местом и поддержание его в рабочем состоянии в процессе изготовления всей партии изделий. Это время состоит из времени технического и организационного обслуживания.

Время технического обслуживания затрачивается на поднастройку технологической системы, смену инструмента, вышедшего из строя, удаление стружки с рабочих органов.

Время организационного обслуживания рабочего места затрачивается на смазывание и чистку оборудования, удаление отходов рабочего процесса технологической системы, приведение в порядок рабочего места.

При работах, требующих интенсивного труда или больших физических усилий, регламентируют время перерывов. При нормальных условиях труда регламентируют время на отдых, связанное с личными потребностями.

Если выделить время, связанное с изготовлением одной единицы изделия, и обозначить его $t_{шт}$ (штучное время), то

$$t_{шт.к} = T_{пз} / n + t_{шт}. \quad (1.7.2)$$

Сумму промежутков времени $t_{от} + t_{вс} = t_{оп}$ называют оперативным временем.

Не все этапы операции осуществляют последовательно. Некоторые вспомогательные переходы можно совмещать во времени (например, время подвода одного суппорта совмещают с временем отвода другого).

В других случаях возможно совмещение рабочего и вспомогательного процессов во времени. Например, при обработке на вертикальном восьмишпиндельном токарном полуавтомате установку и снятие заготовки проводят во время обработки заготовок на других позициях. В связи с этим пользуются понятием цикла

$$t_{ц} = t_p + t_{хх} + t'_{вх}, \quad (1.7.3)$$

где t_p – время рабочих ходов цикла, оно же основное технологическое время; $t_{хх}$ – время несовмещенных холостых ходов, выполняемых технологической системой; $t'_{вх}$ – вспомогательное время, не совмещенное с технологическим переходом.

Как следует из (1.7.3), продолжительность цикла есть часть штучного времени. С помощью (1.7.1) – (1.7.3) можно определить номинальные затраты времени на технологический процесс.

Как уже отмечалось в п. 1.5.6, рассеяние фактических затрат времени на выполнение технологического процесса как в целом, так и отдельных его этапов носит систематический или случайный характер и оказывает влияние на производительность, ритмичность, качество и себестоимость изготовления изделий (см. рис. 1.5.19). Из рис. 1.5.19 видно, что поля рассеяния такта может достигать более 10 % его номинального значения. При обработке на универсальном оборудовании поле рассеяния, как правило, значительно больше.

Затраты времени на осуществление технологического процесса складываются из затрат времени на составляющие его операции, пролеживание предмета труда между операциями и передачи его от одной операции к другой. Тогда временная цепь технологического процесса будет иметь вид, показанный на рис. 1.5.18, а и б. Поэтому, для определения затрат времени на изготовление партии изделий можно воспользоваться формулой:

$$T_{\Sigma} = T_{u(l)} + \sum_{i=1}^{k-1} T_{\tau(i)}.$$

1.7.2. ОБРАЗОВАНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ

Себестоимость изготовления изделия определяют по формуле (1.4.2), приведенной в п. 1.4.8. Рассмотрим, как формируются перечисленные расходы.

Расходы на материалы

$$M_i = G_1 q_1 - G_2 q_2, \quad (1.7.4)$$

где G_1 – масса материала одной марки, расходуемого на изготовление единицы продукции, кг; q_1 – стоимость 1 кг материала соответствующей марки, руб; G_2 – масса отходов материала данной марки при изготовлении единицы продукции, кг; q_2 – стоимость 1 кг отходов материала соответствующей марки, руб.

Расходы на заработную плату, затрачиваемые на единицу продукции,

$$З = (sz_1 / f_1 + sz_2 / f_2) \frac{t_{\text{шт.к}}}{60}, \quad (1.7.5)$$

где s – часовая ставка 1-го разряда, устанавливаемая на определенный период времени, руб.; z_1 – разрядный коэффициент работы, определяемый по квалификационному справочнику; z_2 – разрядный коэффициент работы, выполняемой наладчиком, обслуживающим данное оборудование; f_1 – число единиц оборудования или рабочих мест, обслуживаемых одним рабочим; f_2 – число единиц оборудования или рабочих мест, обслуживаемых одним наладчиком.

Расходы на содержание и амортизацию средств труда формируются различно для универсальных и специальных средств труда. Для универсальных сначала подсчитывают сумму амортизационных отчислений, приходящихся на 1 мин работы оборудования, а затем умножают ее на время обработки или изготовления детали. Суммируя амортизационные отчисления по всем операциям, находят общую амортизацию, приходящуюся на единицу продукции.

Для специальных средств труда сумму амортизационных отчислений, входящих в себестоимость единицы продукции, вычисляют при делении первоначальных расходов (на необходимое оборудование, приспособления и инструмент) на общее число изделий, подлежащих изготовлению по неизменному чертежу.

Расходы на содержание и амортизацию оборудования, затрачиваемые на осуществление операции, слагаются из расходов O_1 на электроэнергию, O_2 на амортизацию оборудования, O_3 на ремонт оборудования и O_4 расходов на амортизацию части здания, относящейся к данному оборудованию, т.е.

$$O = O_1 + O_2 + O_3 + O_4.$$

Расходы на электроэнергию, затрачиваемую на одну операцию,

$$O_1 = \frac{MK_m q_3}{\eta_m \eta_c 60} t_{шт}, \quad (1.7.6)$$

где N – мощность электродвигателя, кВт; K_m – коэффициент машинного времени, равный отношению машинного времени к общему времени обработки; q_3 – стоимость 1 кВт · ч электроэнергии; η_m – КПД двигателей; η_c – КПД сети.

Расходы на амортизацию универсального оборудования

$$O'_2 = \frac{q_0 a_1 n}{FK_1 100 \cdot 60} t_{шт}. \quad (1.7.7)$$

Расходы на амортизацию специального оборудования

$$O_2^* = q_0 n / l, \quad (1.7.8)$$

где q_0 – стоимость единицы оборудования, руб.; a_1 – амортизационные отчисления, %; n – число единиц одинакового оборудования, необходимого для выполнения данной операции; F – годового фонд времени работы оборудования, ч; K_1 – коэффициент использования оборудования; отношение времени работы оборудования к общему времени обработки; l – общее число объектов производства, подлежащих изготовлению по неизменным чертежам.

Расходы на ремонт

$$O_3 = a_2 O_2 / 100, \quad (1.7.9)$$

где a_2 – средняя норма расходов на ремонт, определяется в % от расходов на амортизацию оборудования.

Расходы на амортизацию части здания

$$O_4 = \frac{QHq_3a_3n}{F \cdot 100 \cdot 60} t_{шт}, \quad (1.7.10)$$

где Q – площадь здания, занимаемая оборудованием, m^2 ; H – высота здания, м; q_3 – стоимость $1 m^3$, руб.; a_3 – амортизации здания, %.

Расходы на содержание и амортизацию приспособлений, приходящиеся на операцию:

– универсальных

$$\Pi = \frac{q_n(a_4 + a_5)n}{FK_1 \cdot 100 \cdot 60} t_{шт}; \quad (1.7.11)$$

– специальных

$$\Pi_1 = (1 + a_6 / 100) \frac{q_n n}{l}, \quad (1.7.12)$$

где q_n – стоимость одного приспособления, руб.; a_4 – амортизационные отчисления, %; a_5 , a_6 – расходы на содержание приспособления, в % от его стоимости.

Расходы на содержание и амортизацию инструмента, приходящиеся на операцию:

– универсального

$$U = \sum_{i=1}^s \frac{(q_n + it_n r_n) a K_n}{(1+i) R 60} t_{от}; \quad (1.7.13)$$

– специального

$$U_1 = \sum_{i=1}^s \frac{(q_n + it_n r_n) K_c}{l} t_{от}; \quad (1.7.14)$$

где q_n – стоимость инструмента, руб.; i – число переточек, допускаемых инструментом; t_n – время, затраченное на переточку; r_n – стоимость 1 ч переточки, руб.; K_n – коэффициент использования инструмента, равный отношению времени работы данного инструмента к $t_{шт}$; a – число одинаковых, одновременно работающих инструментов; R – стойкость инструмента (время между двумя переточками), ч; K_c – число одинаковых инструментов, необходимых для выпуска l объектов, изготавливаемых по неизменным чертежам; s – число инструментов различных типов, участвующих в данной операции.

По формулам (1.7.4) – (1.7.14) можно судить о том, какие факторы влияют на себестоимость изготовления изделия.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На выполнение каких работ затрачивается основное технологическое время?
2. На выполнение каких работ затрачивается вспомогательное время?
3. На выполнение каких работ затрачивается подготовительно-заключительное время?
4. Что входит в состав оперативного времени?
5. Запишите уравнение штучного времени.
6. Чем штучное время отличается от штучно-калькуляционного времени?
7. Из чего складываются расходы на материал изделия?
8. Из чего складываются расходы на заработную плату, затрачиваемые на единицу продукции?
9. В чем заключается разница в расходах на амортизацию универсального и специального оборудования?

Глава 1.8

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

1.8.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Задачей математического описания технологического процесса является установление количественных соотношений между его выходными показателями, элементами режима рабочего процесса, конструктивными и качественными характеристиками технологической системы, характеристиками предмета труда, условиями протекания технологического процесса и действующими факторами. Итогом математического описания технологического процесса является построение его математической модели.

Математическая модель, с достаточной точностью отражающая реальный технологический процесс, открывает широкие возможности в проектировании эффективных технологических процессов, их исследовании, разработке и нахождении принципиально новых решений. Не менее важным ее преимуществом является предоставление возможности широкого применения для решения указанных задач метода моделирования с использованием ЭВМ, что позволяет резко сократить трудоемкость проектных работ, затрачиваемое на них время и дает возможность проанализировать множество вариантов при поиске оптимального решения.

Все разновидности математического описания технологических процессов можно свести к двум принципиально отличным подходам: построение детерминированных моделей; построение вероятностно-статистических моделей.

Вероятностно-статистические модели позволяют оценить уровень искомой величины, выявить случайные и систематические ее составляющие, но при этом не объясняют физической сущности явления ее образования. В этом случае явление рассматривается как "черный ящик" и между выходной и входной величиной устанавливаются корреляционные зависимости. Кроме того, по вероятностно-статистической модели невозможно рассчитать конкретное значение искомой величины, а можно лишь оценивать пределы ее изменения. При построении моделей такого типа необходимо проводить значительный объем экспериментов для сбора статистических данных.

Детерминированную модель строят на основе теоретического и экспериментального исследования сущности технологического процесса, его

причинно-следственных связей. Иными словами, построение детерминированной модели основано на раскрытии внутреннего содержания "черного ящика", и в этом заключается главное преимущество детерминированных моделей, так как знание и понимание сущности технологического процесса, его глубинных закономерностей позволяет находить эффективные и принципиально новые пути повышения качества и производительности процесса, снижения его себестоимость.

Однако следует помнить, что любое явление, процесс не могут быть полностью познаны, всегда будут оставаться элементы неопределенности, обусловленные ограниченностью познавательных возможностей. Установленные закономерности технологического процесса охватывают только общие его черты, в то время как реальный процесс имеет много индивидуальных сторон, поэтому любой закон в определенной степени схематизирует и упрощает явление.

Наилучший результат получается при построении комбинированной модели, являющейся совокупностью детерминированной и вероятностно-статистической моделей.

Математическая модель технологического процесса представляет собой совокупность уравнений, определяющих значения выходных его показателей, и ограничения на те или иные аргументы уравнений в виде конкретных значений или неравенств.

В общем виде математическую модель технологического процесса, выполняемого в одну операцию, можно представить в виде схемы (рис. 1.8.1).

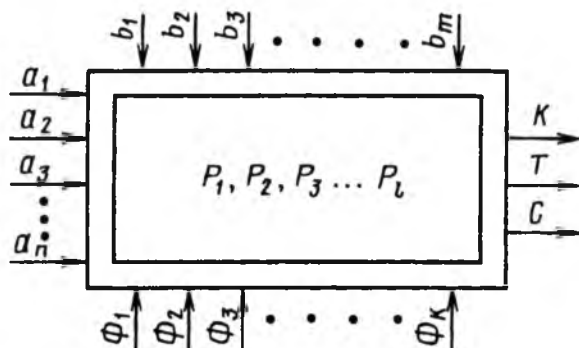


Рис. 1.8.1. Схема формирования выходных показателей технологического процесса

Обозначим выходные показатели через K , T и C (здесь K – качество изготовления изделия; T – время, затрачиваемое на технологический процесс; C – себестоимость изготовления изделия); $a_1, a_2, \dots, a_n$ – характеристики предмета труда, поступающего на технологическую систему; $b_1, b_2, \dots, b_m$ – характеристики технологической системы; P_1, P_2, P_l – элементы режима рабочего процесса; $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k$ – факторы, действующие на технологическую систему, и условия протекания технологического процесса.

Установление качественных и количественных связей между перечисленными величинами является одной из важнейших научных задач технологии машиностроения. В общем виде математическую модель можно записать следующим образом:

$$K = f_1(a_1, a_2, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_m; P_1, P_2, \dots, P_l; \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k; T);$$

$$T = f_2(a_1, a_2, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_m; P_1, P_2, \dots, P_l; \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k; d; K);$$

$$C = f_3(a_1, a_2, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_m; P_1, P_2, \dots, P_l; \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k; T; j),$$

где d, j – факторы, оказывающие влияние соответственно на затраты времени и себестоимость.

Для решения практических задач необходимо эти зависимости выразить в явном виде.

На сегодня уже накоплен большой материал по изучению сущности механизма образования погрешностей машины, на базе которого разработана теория точности механизмов и машин, отражающая закономерности возникновения погрешностей кинематических цепей; довольно широко изучены вопросы точности неподвижных сопряжений деталей машины, создано учение о точности обработки деталей, и в первую очередь механической обработки, являющееся одним из важнейших разделов технологии машиностроения и обобщающее громадный фактический материал по изучению взаимосвязей действующих факторов, зависимостей между действующими факторами и погрешностями изготовления деталей и сборки машин.

Большую роль в становлении и развитии учения о точности сыграли советские исследователи Б.С. Балакшин, Н.А. Бородачев, Н.Г. Бруевич, К.В. Вотинов, А.Н. Гаврилов, А.А. Зыков, В.М. Кован, В.С. Корсаков, Н.А. Калашников, Д.Н. Решетов, Э.А. Сатель, А.П. Соколовский, А.Б. Яхин и др.

Расчетно-аналитический метод определения суммарной погрешности обработки деталей на станках длительное время был основным методом прогнозирования ожидаемой погрешности.

Основополагающим принципом рассматриваемого метода является принцип суперпозиции, когда действие каждой из элементарных погрешностей рассматривается независимо от других, а суммарная погрешность складывается из составляющих путем их суммирования. Особенность этого метода – независимое рассмотрение процесса формирования каждой составляющей погрешности в детерминированном виде, т.е. с позиций полной определенности процессов, протекающих в технологической системе как в прошлом, так и будущем.

Суммарная погрешность Δ определяется из равенства

$$\Delta = \Delta Y + \epsilon + \Delta u + \Delta H + \Delta T + \Sigma \Delta \Phi,$$

где ΔY – погрешность, вызываемая упругими деформациями технологической системы под действием сил резания; ϵ – погрешность установки заготовки; Δu – погрешность, вызываемая размерным износом инструмента; ΔH – погрешность настройки станка; ΔT – погрешность, вызываемая тепловыми деформациями технологической системы; $\Sigma \Delta \Phi$ – сумма погрешностей формы данного элемента, вызываемых геометрическими неточностями станка, деформацией заготовки под действием сил закрепления и неравномерными по различным сечениям заготовки упругими деформациями технологической системы. К достоинствам расчетно-аналитического метода относятся его простота и возможность применения в инженерной практике.

В свое время разработка расчетно-аналитического метода явилась крупным шагом в развитии учения о точности, позволило выйти на более высокий уровень обобщения.

Другим методом в решении проблемы повышения точности изготовления изделий является метод размерного анализа. Если с помощью расчетно-аналитического метода устанавливаются связи между погрешностью изготовления изделия на технологической системе, то с помощью размерного анализа устанавливается влияние изменения положения деталей технологической системы на погрешность изготовления.

Непрерывный рост требований к точности изготовления изделия требует дальнейшего развития обоих направлений и, в первую очередь, разработки строгого математического аппарата в определении погрешности обработки, начиная с уточнения формулировки понятия "погрешность детали".

Работы, посвященные исследованию и описанию процесса образования погрешностей изготовления изделий, отличаются большой разноплановостью, что привело к построению многочисленных математических моделей.

Все это при наличии множества работ по изучению вопросов точности, огромном разнообразии машин и деталей, а также технологического оборудования, оснастки и методов изготовления изделий породило бесчисленное множество частных рекомендаций по решению вопросов точности, что чрезвычайно затрудняет их практическое применение в нахождении оптимальных решений.

Необходимость в совершенствовании расчетов на точность привело к разработке нового расчетного метода, объединяющего в себе принципиальные положения расчетно-аналитического метода и метода размерного анализа [2].

1.8.2. МЕТОД КООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ С ДЕФОРМИРУЮЩИМИСЯ СВЯЗЯМИ

В исследованиях точности большое внимание уделялось изучению влияния отдельных факторов на погрешность изготовления. Что же касается метода суммирования отдельных погрешностей, то его развитию практически не уделялось достаточного внимания, и это стало тормозом в повышении точности расчетов и эффективного использования результатов исследований.

Математическое описание механизма образования геометрических погрешностей изготовления изделия, отражающее совокупное влияние большинства факторов, порождающих погрешности, представляется сложной задачей. Трудности решения этой задачи объясняются большим многообразием технологических систем, разнообразием конструкций изготавливаемых изделий, их материала, методов изготовления и условий, в которых протекают технологические процессы.

Среди всего этого многообразия необходимо найти то общее в механизме образования погрешностей, что присуще каждому фактору в его влиянии на точность изготовления изделия. Чтобы решить эту задачу, необходимо оперировать идеализированными, абстрактными объектами, взаимоотношения между которыми с достаточной точностью отражают существенные связи между реальными предметами и явлениями технологического процесса. Такое абстрагирование реальных объектов позволяет отвлечься от сложной и запутанной картины реальных процессов образо-

вания погрешностей и анализировать отношения между абстрактными, а не реальными объектами.

В результате длительных исследований был разработан метод координатных систем с деформирующимися связями, в основу которого положено представление технологической системы как совокупности координатных систем, построенных на ее деталях, с наложенными на координатные системы связями.

Рассмотрим подробно этот метод. Как уже отмечалось, любую машину, в том числе и технологическую систему, можно рассматривать как совокупность деталей. В зависимости от служебного назначения каждая деталь может быть лишена шести степеней свободы или иметь одну или несколько степеней свободы.

Лишение детали степеней свободы осуществляется наложением на нее соответствующего числа связей, которые материализуются с помощью опорных точек. Для детали связи между ее поверхностями являются внутренними связями, формирующимися в процессе изготовления детали.

Опорные точки, лишаящие деталь степеней свободы, накладывают на нее внешние связи, которые являются внутренними связями для машины.

Любая машина выполняет свои функции посредством заданного относительного движения рабочих поверхностей. Действующие во время работы машины факторы вызывают изменение геометрических и физикомеханических характеристик деталей, нарушая их внешние связи в машине, что вызывает малые перемещения и повороты деталей.

Чтобы учесть эти явления при описании фактического закона относительного движения рабочих поверхностей, будем считать внешние связи детали деформирующимися. С этой целью в схеме базирования каждой детали опорные точки будем рассматривать как упругие элементы. При этом условимся считать, что вершины опорных точек совпадают с основными базами базируемой детали, а основания опорных точек принадлежат вспомогательным базам детали, к которой присоединяется базируемая деталь. Тогда под действием возмущающих факторов вершины опорных точек будут изменять свое положение относительно своих оснований.

На основании изложенного, пользуясь представлением детали как совокупности рабочих и базирующих поверхностей и построив системы координат на основных базах деталей, машину (технологическую систему) можно заменить эквивалентной ей схемой (рис. 1.8.2). Эта схема представляет собой совокупность систем прямоугольных координат,

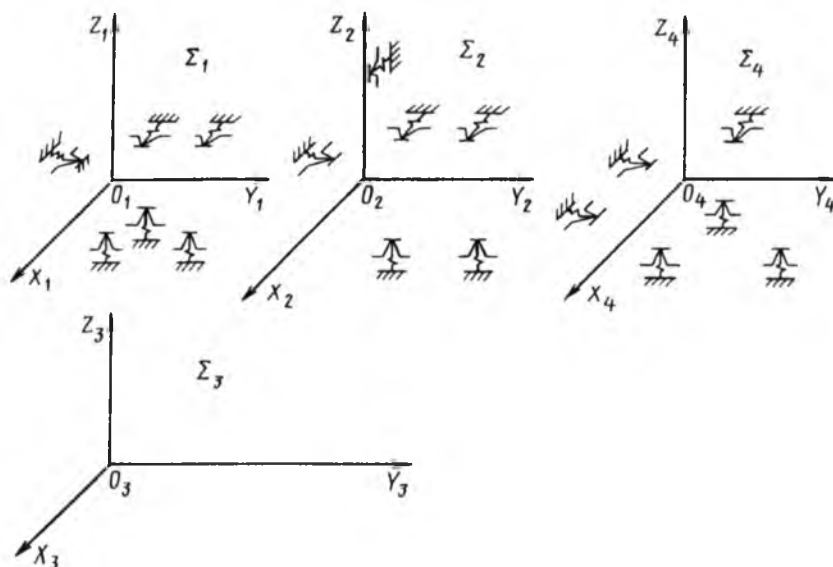


Рис. 1.8.2. Эквивалентная схема

расположенных в той последовательности, в которой расположены детали в машине, с наложенными на каждую систему координат деформируемыми связями (представленными в виде опорных точек), численно равными числу лишенных степеней свободы данной детали. Деформирующиеся свойства опорных точек представлены на схеме с помощью пружин (опорная точка изображена в виде "галочки" со штрихом, проведенным перпендикулярно направлению движения, которого лишается деталь этой опорной точкой).

В зависимости от физической природы действующих факторов, внутренние связи машины должны обладать соответствующими свойствами. Например, если машина находится под воздействием силового фактора, то связи должны обладать определенной жесткостью. В этом случае деформация связей является результатом контактных, собственных упругих и пластических деформаций деталей. Если же машина находится под воздействием теплового фактора, то связи должны обладать теплоустойчивостью. Тогда их деформации зависят от степени нагрева, теплопроводности детали, коэффициента линейного расширения материала, схемы базирования детали и т.д.

Все разновидности деформирующихся связей можно свести к двум группам: упругие и неупругие связи. Под упругими связями будем понимать такие связи, с помощью которых опорные точки, а следовательно, и деталь принимают первоначальное положение после прекращения действия факторов. В случае наличия неупругих связей после прекращения действия факторов опорные точки не возвращаются в исходное положение.

Итак, под *эквивалентной схемой* машины (технологической системы) будем понимать совокупность рабочих поверхностей и координатных систем, построенных на основных базах деталей технологической системы, с наложенными на них деформирующимися связями в виде опорных точек, расположенных в соответствии со схемой базирования каждой детали, и действующих факторов.

В зависимости от того, какие стороны технологического процесса должны быть описаны с помощью математической модели, в эквивалентную схему следует включать соответствующие факторы.

Представление машины в виде эквивалентной схемы данного вида может служить единой основой для построения математических моделей механизма образования геометрических погрешностей машин различного назначения, конструктивного решения, компоновки.

Метод координатных систем с деформирующимися связями универсален и на его основе можно решать следующие задачи:

- определение геометрической погрешности как результата совместного влияния отклонений размерных и кинематических связей машины;
- определение суммарного влияния многочисленных факторов на погрешность;
- определение влияния каждого фактора в отдельности на погрешность;
- исследование влияния конструктивных параметров, качественных характеристик машины и параметров режима рабочего процесса на погрешность.

1.8.3. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛИ МЕТОДОМ КООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ С ДЕФОРМИРУЮЩИМИСЯ СВЯЗЯМИ

При построении модели необходимо, чтобы она отражала описываемый процесс с требуемой точностью и в то же время была максимально простой. Часто под критерием простоты модели понимается наименьшая трудоемкость вычислений с ее помощью.

Между двумя указанными требованиями имеет место противоречие: с одной стороны: необходимо повысить точность расчетов, а с другой стороны – упростить модель. Структура модели обусловлена задачей. Математические модели могут описывать разные стороны технологического процесса. Чем более полно модель отражает этот процесс, тем она точнее и более широкий круг задач может быть решен.

Чтобы избежать ненужной сложности модели и неоправданного увеличения трудоемкости расчетов, необходимо строить в каждом случае такую модель, которая позволяла бы решать только поставленную задачу. Модели (рис. 1.8.3), описывающие механизм формирования геометрии изделия, могут быть трех уровней.

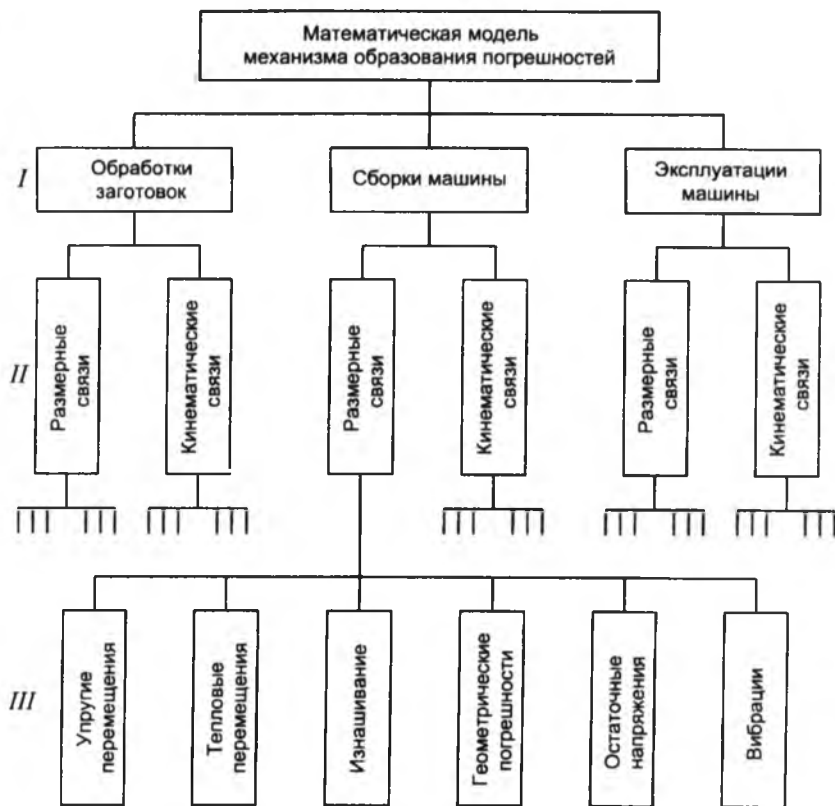


Рис. 1.8.3. Классификация моделей: I, II, III – уровни моделей

На первом уровне модели различают по типу процесса. На втором уровне модели описывают погрешности, обусловленные погрешностями размерных и кинематических связей. В модели третьего уровня включают действующие факторы и соответствующие характеристики качества машины, препятствующие вредному влиянию этих факторов.

Независимо от того, какую модель из приведенной классификации будут разрабатывать, ее построение имеет следующие этапы: постановка задачи; построение эквивалентной схемы; вывод уравнения относительного движения рабочих поверхностей; составление уравнения движения с учетом факторов, нарушающих заданный ход технологического процесса; проверка модели на адекватность.

В основу построения модели методом координатных систем с деформирующимися связями положены причинно-следственные связи механизма образования погрешностей изготовления детали (рис. 1.8.4). Рассмотрим содержание этапов построения модели.

Постановка задачи. Построение модели прежде всего предполагает выбор критерия оценки результата процесса. При обработке на станке заготовка должна приобрести геометрию детали с отклонениями, не превышающими границ, заданных допуском.

Как известно, точность детали принято характеризовать точностью линейных и угловых размеров и формы поверхностей детали. При этом известные методы и критерии оценки по каждому из перечисленных показателей приводят к обезличиванию факторов, влияющих на погрешность обработки. На рис. 1.8.5 показаны два разных профиля поперечных сечений реального вала. С помощью известной методики оценки погрешности формы отклонение от круглости определяется как максимальное отклонение точки профиля от прилегающей окружности. При таком методе оценки круглости у двух разных по форме поперечных сечений величины отклонений могут оказаться одинаковыми. Это подчеркивает

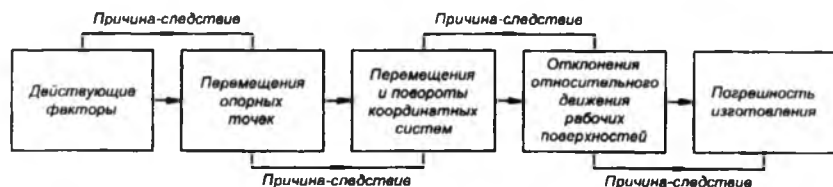


Рис. 1.8.4. Схема причинно-следственных связей механизма образования погрешностей обработки детали

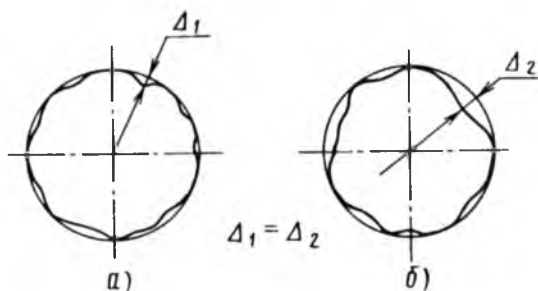


Рис. 1.8.5. Отклонение от круглости вала в поперечных сечениях:

а, б – профили поперечного сечения вала соответственно при отклонении Δ_1 и Δ_2

то, что при такой оценке погрешности утрачивается непосредственная связь между искажением формы профиля и фактором, его порождающим.

С другой стороны, точность одной и той же по форме детали оценивают по разным методам – в зависимости от ее служебного назначения. Например, отклонение от круглости поперечного сечения цилиндрического вала можно определять как отклонение от прилегающей окружности, так и от средней окружности, построенной из условия минимума суммы квадратов отклонений точек профиля. В итоге оценка точности одного и того же профиля окажется разной.

Аналогично по-разному оценивается точность детали и по другим показателям – размеру и относительному повороту поверхностей детали.

Таким образом, точность одной и той же детали, но разного служебного назначения будет разной. Наличие такой неоднозначности не позволяет выбрать погрешность детали в качестве критерия погрешности обработки. Учитывая изложенное, следует различать понятия погрешность обработки и погрешность детали.

Под погрешностью детали будем понимать отклонение от заданных линейных и угловых размеров, формы ее поверхностей, определяемых по известным методикам в соответствии со служебным назначением детали.

Чтобы сформулировать понятие погрешности обработки, обратимся к схеме (рис. 1.8.6, *а*) токарной обработки заготовки. Каждая точка обработанной поверхности формируется соответствующими точками режущих кромок лезвия резца в соответствующий момент времени в системе отсчета, построенной на технологических базах заготовки.

Поэтому *под погрешностью обработки* условимся понимать отклонения $\Delta \vec{R}_i$ фактического радиуса-вектора $\Delta \vec{R}_{\Phi_i}$ i -й точки обработанной

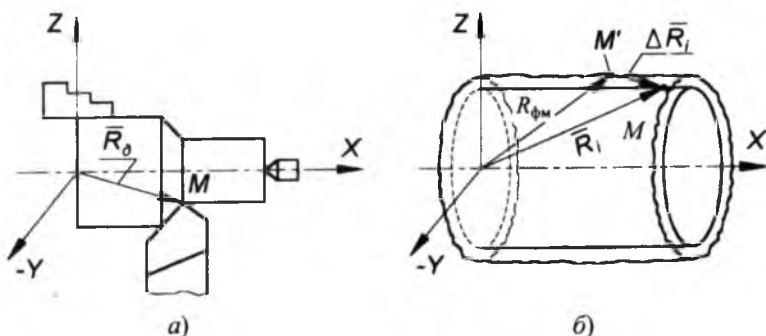


Рис. 1.8.6. Схемы для токарной обработки заготовки (а) и образование погрешности обработки $\Delta \bar{R}_i$ в точке М детали (б)

поверхности детали от заданного $\bar{R}_i$, отсчитанные в j -й момент времени обработки в системе координат, построенной на технологических базах детали. Согласно рис. 1.8.6, б

$$\Delta \bar{R}_i = \Delta \bar{R}_{\Phi_i} - \bar{R}_i.$$

Преимуществом такой оценки погрешности обработки является однозначность ее определения при действии любого рассматриваемого фактора в любой точке обработанной поверхности детали. Это позволяет устанавливать влияние действия каждого фактора на погрешность обработки.

К сожалению, в многочисленных исследованиях, посвященных изучению влияния различных факторов, устанавливались зависимости между действующим фактором и не погрешностью обработки $\Delta \bar{R}_i$, а погрешностью детали, определяемой по конкретной методике. В итоге полученные результаты оказывались справедливыми только для выбранной методики оценки точности детали. Поэтому полученные зависимости нельзя было экстраполировать на случаи оценки точности по другим методикам, в результате полученные зависимости приобретали частный характер.

Построение эквивалентной схемы. При обработке на станке заготовка включается в размерные и кинематические цепи технологической системы в качестве замыкающих звеньев. Согласно уравнению размерной цепи, погрешность обработки в любой точке детали будет равна алгебраической сумме погрешностей составляющих звеньев размерной це-

пи. Так, в размерной цепи токарного станка (рис. 1.8.7, *a*) замыкающим звеном является расстояние между вершиной лезвия резца и осью вала. В этом случае ось вала совпала с осью координатной системы, построенной на технологических базах заготовки.

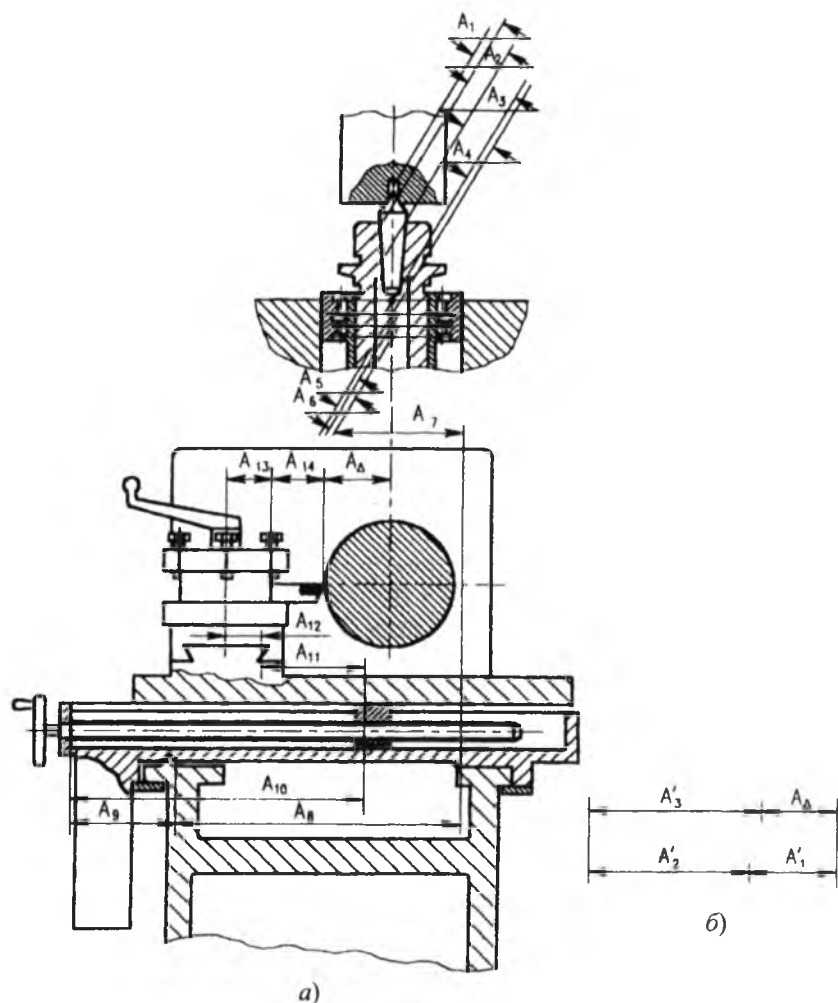


Рис. 1.8.7. Размерные цепи технологической системы токарного станка:
a – размерная цепь; *б* – размерная цепь из приведенных звеньев

В соответствии с методом координатных систем с деформирующимися связями для построения эквивалентной схемы на основных базах деталей, размеры которых вошли в размерную цепь как составляющие звенья, строят системы прямоугольных координат. Построение каждой системы координат начинается с определения схемы базирования каждой из этих деталей.

Если детали оставляют одну или несколько степеней свободы, то число опорных точек в схеме базирования будет меньше шести и может получиться неполный комплект основных баз. В этом случае, построив координатные плоскости на имеющихся поверхностях основных баз, необходимо достроить координатную систему, проведя недостающие координатные плоскости.

Часто число деталей, вошедших своими размерами в размерную цепь, бывает значительным. Это приводит к большому числу координатных систем в эквивалентной схеме и, как следствие, громоздкости математических выражений и значительному повышению трудоемкости вычислений; поэтому необходимо стремиться к уменьшению числа координатных систем в эквивалентной схеме. Это возможно в результате построения координатных систем на поверхностях основных баз сборочных единиц. Тогда размерную цепь строят из приведенных звеньев, в которой каждое приведенное составляющее звено представляет собой замыкающее звено группы звеньев.

В примере токарного станка (рис. 1.8.7, б) составляющие звенья размерной цепи можно объединить в группы: патрон – шпиндель – передняя бабка; резец – суппорт – поперечные и продольные салазки. Тогда размерная цепь будет содержать только четыре звена (см. рис. 1.8.7, б): A_Δ , A'_1 , A'_2 , A'_3 – отражающие размерные связи между заготовкой, шпиндельной, суппортной группами и станиной.

Чтобы в эквивалентной схеме учесть кинематику технологической системы, в координатных системах, построенных на деталях с заранее обусловленным наличием степеней свободы, указывают заданное движение (поступательное или вращательное). В соответствии с изложенным, на рис. 1.8.8 показана эквивалентная схема технологической системы токарного станка для случая с приведенными звеньями, в которой за неподвижную систему принята система Σ_c , построенная на направляющих станины, а на технологических базах заготовки построена координатная система Σ_z , а $\Sigma_{ш}$, $\Sigma_{и}$ построены соответственно на основных базах шпинделя и инструмента. Система $\Sigma_{ш}$ имеет вращательное движение (ω), а система $\Sigma_{и}$ – поступательное ($\bar{S}$).

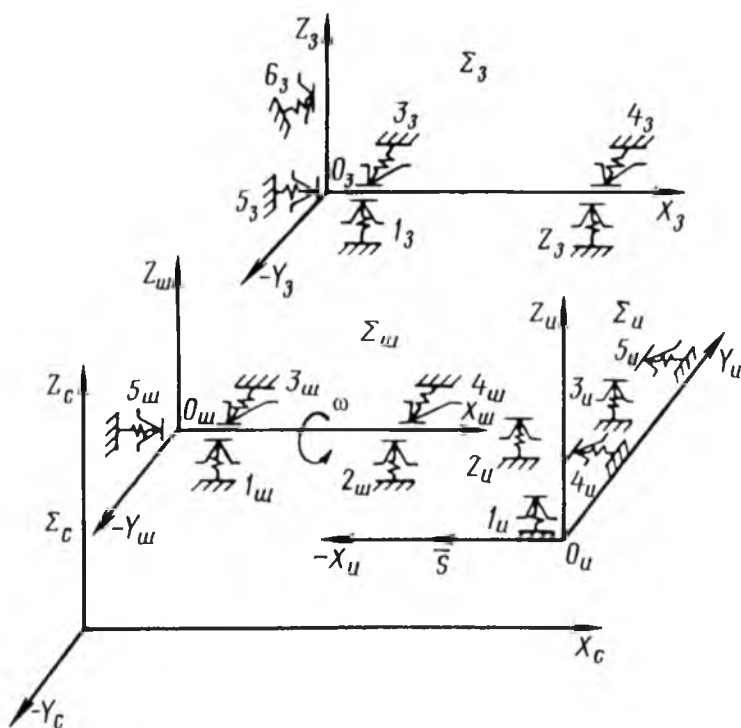


Рис. 1.8.8. Эквивалентная схема технологической системы токарного станка:

$\Sigma_3, \Sigma_{и}, \Sigma_{ш}, \Sigma_c$ – координатные системы соответственно заготовки, инструмента с суппортной группой, шпинделя, станины

В тех случаях, когда необходимо раскрыть механизм формирования погрешности обработки, обусловленной отклонениями звеньев кинематических цепей, следует ввести дополнительные построения. С этой целью определяют кинематическую цепь, устанавливают схему базирования каждого элемента кинематической цепи и на поверхностях основных баз этих элементов строят координатные системы [2].

Вывод уравнения относительного движения режущих кромок инструмента и технологических баз заготовки. Чтобы определить погрешность обработки $\Delta \bar{R}_i$ в i -й точке полученной поверхности обработанной детали, следует решить уравнение относительного движения режущих кромок инструмента и технологических баз.

Запишем уравнение движения на примере токарной обработки. Пусть резец совершает поступательное движение, а заготовка вращается (рис. 1.8.9). Тогда в неподвижной координатной системе Σ_3 заготовки резец будет совершать винтовое движение. Задача сводится к тому, чтобы определить $\Delta \bar{R}_1$ в любой момент обработки. Если говорить строго, то необходимо записать уравнение движения режущих кромок лезвия, формирующих поверхность вала. Для упрощения изложения вопроса запишем уравнение движения одной из точек режущих кромок, например вершины лезвия (точка M).

Согласно схеме (см. рис. 1.8.9), уравнение движения точки M в системе Σ_3 будет иметь вид:

$$\begin{cases} x_3 = f_1(x_n, y_n, z_n, t); \\ y_3 = f_2(x_n, y_n, z_n, t); \\ z_3 = f_3(x_n, y_n, z_n, t), \end{cases} \quad (1.8.1)$$

где x_3, y_3, z_3 — координаты точки M в координатной системе Σ_3 заготовки; x_n, y_n, z_n — координаты точки M в координатной системе Σ_n резца; t — параметр движения (время, угол поворота и др.).

При обработке заготовки происходит изменение относительного положения систем Σ_3 и Σ_n , поэтому и значения x_3, y_3, z_3 будут изменяться.

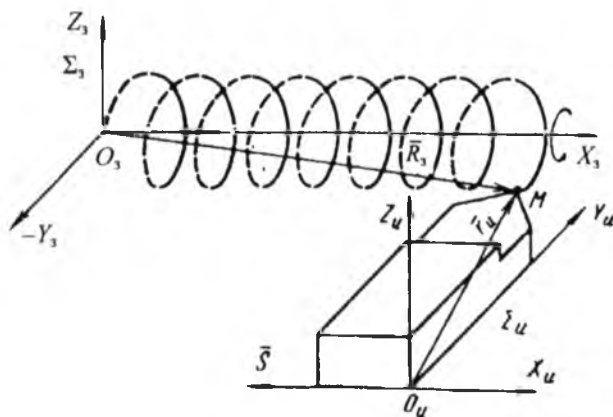


Рис. 1.8.9. Схема движения вершины резца в координатной системе заготовки Σ_3

Чтобы записать уравнение фактического движения точки M в системе Σ , необходимо в правую часть уравнения (1.8.1) в качестве аргументов включить величины, характеризующие каждый блок схемы, приведенной на рис. 1.8.4. Согласно этой схеме, нарушение относительного движения является следствием дополнительных перемещений и поворотов координатных систем эквивалентной схемы (см. рис. 1.8.8).

Чтобы уравнение движения (1.8.1) отражало перемещения и повороты координатных систем Σ_z , Σ_{ψ} , Σ_{θ} эквивалентной схемы в неподвижной системе Σ_c , следует в его правую часть включить характеристики, определяющие положение каждой координатной системы.

Известно, что положение твердого тела в пространстве относительно неподвижной системы координат Σ может быть определено с помощью шести параметров: трех угловых и трех линейных координат системы координат Σ' , жестко связанной с этим телом (рис. 1.8.10). Таким образом, положение детали в системе координат Σ может быть определено с помощью радиус-вектора $\vec{r}$ и матрицы углов поворотов:

$$\vec{r}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}; \quad M = M_{(x, \varphi)} \cdot M_{(y, \psi)} \cdot M_{(z, \theta)},$$

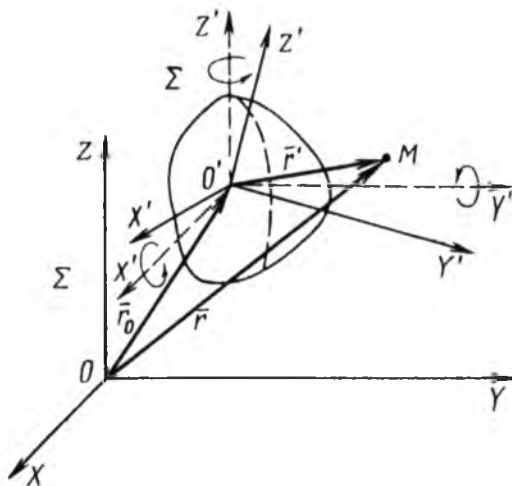


Рис. 1.8.10. Положение тела Σ' в неподвижной системе координат Σ

где x, y, z – координаты начала системы координат Σ' в системе Σ ; $M_{(x, \varphi)}$, $M_{(y, \psi)}$, $M_{(z, \theta)}$ – матрицы поворотов против часовой стрелки системы координат Σ' соответственно на угол φ вокруг оси $O'X'$, на угол ψ вокруг оси $O'Y'$ и на угол θ вокруг оси $O'Z'$.

Введем в правую часть уравнения движения (1.8.1) параметры, определяющие положения каждой координатной системы эквивалентной схемы. Это выполняют с помощью формул перехода из одной системы координат в другую.

В совокупности координатных систем эквивалентной схемы, где $\Sigma_3 = \Sigma_1$, $\Sigma_{ш} = \Sigma_2$, $\Sigma_c = \Sigma_3$ и $\Sigma_n = \Sigma_4$ за неподвижную систему координат примем Σ_3 (рис. 1.8.11). Соединив начала координатных систем радиус-векторами, можно записать два векторных равенства:

$$\bar{R} = \bar{r}_{02} + \bar{r}_{01} + \bar{r}; \quad (1.8.2)$$

$$\bar{R} = \bar{r}_{04} + \bar{r}_M. \quad (1.8.3)$$

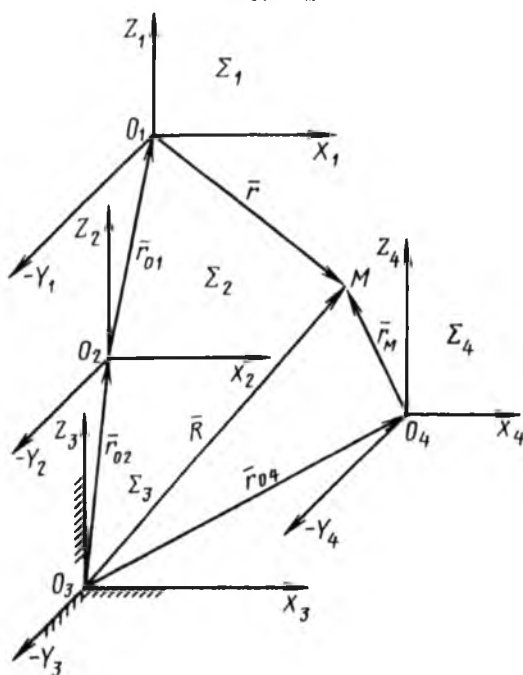


Рис. 1.8.11. Схема векторных связей координатных систем эквивалентной схемы

Приравняв правые части равенств (1.8.2) и (1.8.3), получим уравнение радиус-вектора $\vec{r}$, определяющее положение точки M в системе Σ_1 :

$$\vec{r} = \vec{r}_{04} + \vec{r}_m - \vec{r}_{02} - \vec{r}_{01}. \quad (1.8.4)$$

Пользуясь формулами перехода из одной координатной системы в другую, найдем последовательно положение точки M в координатных системах Σ_3 , Σ_2 , Σ_1 . С этой целью запишем формулы перехода, для чего найдем положение точки M координатной системы Σ' в системе Σ (рис. 1.8.12) при их параллельном положении. Уравнения координат точки M в системе Σ будут иметь следующий вид:

$$x = x_0 + x';$$

$$y = y_0 + y' \text{ или } \vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r}';$$

$$z = z_0 + z',$$

где x' , y' , z' – координаты точки M в системе Σ' ; x_0 , y_0 , z_0 – координаты точки O' в системе Σ .

В общем случае система Σ' может быть непараллельна системе Σ , тогда в формулу перехода должны быть включены углы ее поворотов. Пусть точка M задана в системе Σ' ; надо определить ее положение в системе Σ .

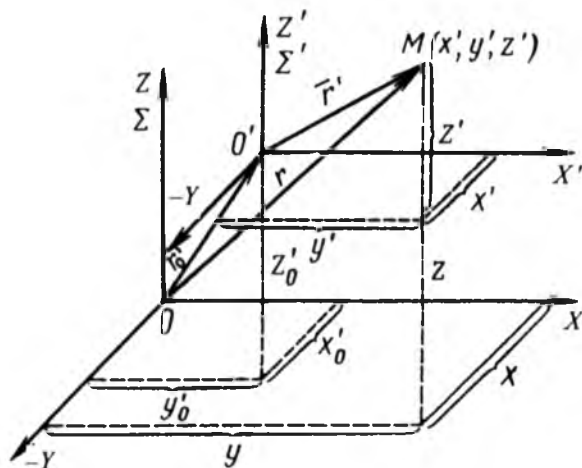


Рис. 1.8.12. Схема определения положения точки M в координатной системе Σ при параллельном расположении системы Σ'

Пусть система Σ' повернута в пространстве так, что ее оси будут непараллельны осям системы Σ (рис. 1.8.13, а), при этом начала систем Σ и Σ' совпадают.

При повернутой системе Σ' положение точки M в системе Σ определяется радиус-вектором

$$\vec{r} = M' \vec{r}',$$

где M' – матрица поворота системы Σ' в системе Σ ; $\vec{r}$ – радиус-вектор, определяющий положение точки M в системе Σ' .

В этом случае формула перехода точки M из системы Σ' в систему Σ будет иметь вид

$$\begin{aligned} x &= \cos(\widehat{i \bar{i}})x' + \cos(\widehat{i \bar{j}})y' + \cos(\widehat{i \bar{k}})z'; \\ y &= \cos(\widehat{j \bar{i}})x' + \cos(\widehat{j \bar{j}})y' + \cos(\widehat{j \bar{k}})z'; \\ z &= \cos(\widehat{k \bar{i}})x' + \cos(\widehat{k \bar{j}})y' + \cos(\widehat{k \bar{k}})z', \end{aligned} \quad (1.8.5)$$

где $\cos(\widehat{i \bar{i}})$, $\cos(\widehat{i \bar{j}})$, ..., $\cos(\widehat{k \bar{k}})$ – косинусы углов (направляющие косинусы) между осями систем Σ и Σ' , $\bar{i}$, $\bar{j}$, $\bar{k}$ – единичные векторы.

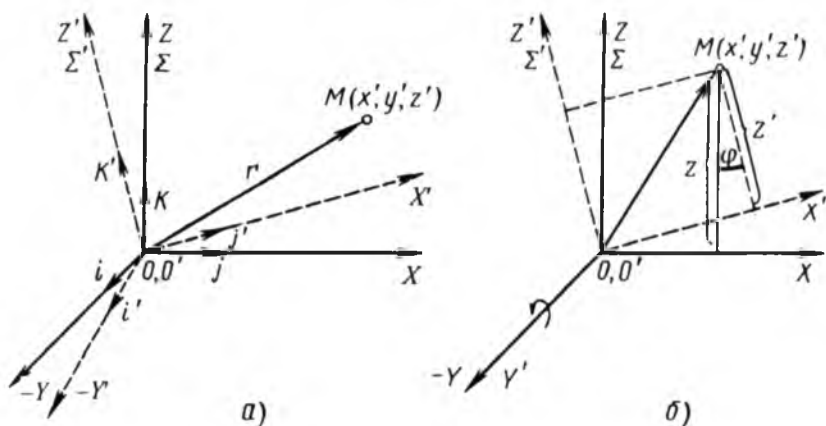


Рис. 1.8.13. Схема определения положения точки M в системе Σ :
а – общий случай, когда Σ' повернута вокруг трех осей OX , OY , OZ ;
б – при повороте системы Σ' вокруг оси OX

Влияние поворота системы Σ' на положение точки M в системе Σ отражено через направляющие косинусы. С целью сокращения записи введем обозначения направляющих косинусов через u_i :

$$\cos(\bar{i} \bar{i}') = u_{11}; \quad \cos(\bar{i} \bar{j}') = u_{12}; \quad \cos(\bar{i} \bar{k}') = u_{13};$$

$$\cos(\bar{j} \bar{i}') = u_{21}; \quad \cos(\bar{j} \bar{j}') = u_{22}; \quad \cos(\bar{j} \bar{k}') = u_{23};$$

$$\cos(\bar{k} \bar{i}') = u_{31}; \quad \cos(\bar{k} \bar{j}') = u_{32}; \quad \cos(\bar{k} \bar{k}') = u_{33}.$$

Тогда формула перехода (1.8.5) будет иметь

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad \text{или} \quad r = M' \bar{r}'.$$

Запишем формулы перехода точки M из координатной системы Σ' в координатную систему Σ при последовательном повороте системы Σ' вокруг осей OX , OY , OZ , при условии, что начала координатных систем Σ и Σ' совпадают.

На рис. 1.8.13, б показано положение системы Σ' после ее поворота вокруг оси OX на угол φ против часовой стрелки.

Уравнения координат точки M в системе Σ будут иметь следующий вид:

$$x = x'1 + y'0 + z'0;$$

$$y = x'0 + y' \cos \varphi + z'(-\sin \varphi);$$

$$z = x'0 + y' \sin \varphi + z' \cos \varphi,$$

или

$$\begin{cases} x = x'; \\ y = y' \cos \varphi - z' \sin \varphi; \\ z = y' \sin \varphi + z' \cos \varphi. \end{cases}$$

Матрица поворота системы Σ' вокруг оси OX на угол φ имеет вид

$$M'_{(x, \varphi)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 \cos \varphi - \sin \varphi \\ 0 \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (1.8.6)$$

Аналогичным образом можно записать матрицы поворотов системы Σ' вокруг других осей.

Уравнение координат точки M в системе Σ , когда система Σ' повернута на угол ψ вокруг оси OY :

$$\begin{cases} x = x' \cos \psi - z' \sin \psi; \\ y = y'; \\ z = -x' \sin \psi + z' \cos \psi. \end{cases}$$

Отсюда

$$M'_{(y, \psi)} = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{pmatrix}. \quad (1.8.7)$$

Уравнение координат точки M в системе Σ , когда система Σ' повернута на угол θ вокруг оси OZ :

$$\begin{cases} x = x' \cos \theta + y'(-\sin \theta); \\ y = x' \sin \theta + y'(\cos \theta); \\ z = z'. \end{cases}$$

Отсюда

$$M'_{(z, \theta)} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1.8.8)$$

В общем случае, когда система Σ' повернута относительно системы Σ и их начала не совпадают, радиус-вектор точки M , определяющий ее положение в системе Σ , будет иметь следующее выражение:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + M \vec{r}',$$

где $\vec{r}_0$ – радиус-вектор, определяющий положение начала координат системы Σ' в системе Σ .

Пользуясь формулами перехода (1.8.5) – (1.8.8) из одной координатной системы в другую, запишем уравнение радиус-вектора $\vec{r}$, определяющего положение точки M в координатной системе Σ_1 , эквивалентной схемы (см. рис. 1.8.11).

С этой целью вернемся к равенству (1.8.4) и запишем значение $\bar{R}$ с учетом поворотов координатных систем $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_4$ в системе Σ_3 .

Положение точки M в системе Σ_1 (см. рис. 1.8.11) определяется радиус-вектором $\bar{R}$, уравнение которого имеет вид

$$\bar{R} = \bar{r}_{04} + M_4 \bar{r}_M. \quad (1.8.9)$$

Положение точки M в системе Σ_2 (рис. 1.8.14) определяется радиус-вектором $\bar{r}_2$, уравнение которого найдем следующим образом. Вначале запишем уравнение радиус-вектора $\bar{R}$, считая, что положение точки M в системе Σ_2 известно, тогда

$$\bar{R} = \bar{r}_{02} + M_2 \bar{r}_2. \quad (1.8.10)$$

или

$$M_2 \bar{r}_2 = \bar{R} - \bar{r}_{02},$$

откуда

$$\bar{r}_2 = M_2^{-1}(\bar{R} - \bar{r}_{02}). \quad (1.8.11)$$

Теперь найдем положение точки M в системе Σ_1 (рис. 1.8.15); ее положение определяется радиус-вектором $\bar{r}$. Сначала запишем уравнение

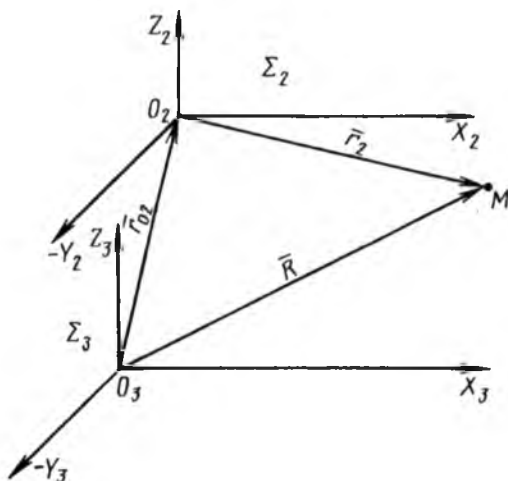


Рис. 1.8.14. Схема определения положения точки M в системе Σ_2

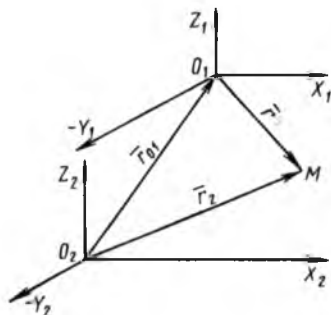


Рис. 1.8.15. Схема определения положения точки M в системе Σ_1

радиус-вектора $\bar{r}_2$, считая, что положение точки M в системе Σ_2 известно, тогда

$$\bar{r}_2 = \bar{r}_{01} + M_1 \bar{r}$$

или

$$M_1 \bar{r} = \bar{r}_2 - \bar{r}_{01}. \quad (1.8.12)$$

Подставим в выражение (1.8.12) значение $\bar{r}_2$:

$$M_1 \bar{r} = M_2^{-1} (\bar{R} - \bar{r}_{02}) - \bar{r}_{01}.$$

В полученное выражение подставим значение $\bar{R}$

$$M_1 \bar{r} = M_2^{-1} (M_4 \bar{r}_m + \bar{r}_{04} - \bar{r}_{02}) - \bar{r}_{01}. \quad (1.8.13)$$

Проведя преобразования, получим уравнение (1.8.13) следующего вида:

$$\bar{r} = M^{-1} [M_2^{-1} (M_4 \bar{r}_m + \bar{r}_{04} - \bar{r}_{02}) - \bar{r}_{01}]. \quad (1.8.14)$$

Уравнение (1.8.14) позволяет определить координаты точки получаемой поверхности детали.

Чтобы определить все точки поверхности, надо в (1.8.14) ввести параметры движения координатных систем в соответствии с кинематикой станка. Например, у токарного станка, эквивалентная схема которого показана на рис. 1.8.8, в соответствии с его кинематической схемой координатная система $\Sigma_{ш}$ имеет вращательное движение вокруг оси $OX_{ш}$, а координатная система Σ_n – поступательное движение вдоль оси OX_n .

С помощью уравнения (1.8.14) можно учесть перемещения и повороты координатных систем эквивалентной схемы, вызванные действующими факторами.

Учет факторов, порождающих погрешности обработки. Для учета влияния действующих факторов на погрешность обработки вначале необходимо ввести в полученное уравнение движения (1.8.14) перемещения опорных точек.

В результате действия факторов (см. рис. 1.8.4) возникают погрешности обработки, которые можно выразить через перемещения опорных точек координатных систем. В свою очередь перемещения опорных точек создают перемещения и повороты координатных систем. Поэтому сначала необходимо установить аналитические зависимости трех перемещений и трех поворотов координатной системы от перемещения опорных точек. Иными словами, в уравнение движения (1.8.14) вместо $\bar{r}_i$ и M_i должны быть введены их функции от перемещений опорных точек. Эти зависимости находят из геометрических соотношений. Например, выведем указанную зависимость для системы Σ_1 (рис. 1.8.16), заданной в системе Σ . Координаты опорных точек в системах Σ_1 и Σ приведены в табл. 1.8.1.

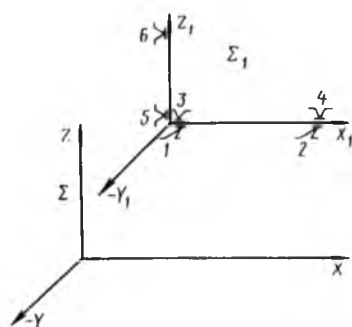


Рис. 1.8.16. Схема расположения опорных точек системы Σ_1

Давая перемещения λ опорным точкам в координатной системе Σ в направлении лишения ими соответствующих степеней свободы, с помощью геометрических соотношений найдем значения отклонений шести

Таблица 1.8.1

Опорная точка	Система Σ_1			Система Σ		
	x_{i1}	y_{i1}	z_{i1}	x_i	y_i	z_i
1	x_{11}	y_{11}	z_{11}	x_1	y_1	z_1
2	x_{21}	y_{21}	z_{21}	x_2	y_2	z_2
3	x_{31}	y_{31}	z_{31}	x_3	y_3	z_3
4	x_{41}	y_{41}	z_{41}	x_4	y_4	z_4
5	x_{51}	y_{51}	z_{51}	x_5	y_5	z_5
6	x_{61}	y_{61}	z_{61}	x_6	y_6	z_6

координат, определяющих новое положение координатной системы Σ_1 в системе Σ . Для варианта расположения опорных точек (см. рис. 1.8.16) зависимости имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}x &= \lambda_5; \quad y = \lambda_3 + x_{11} \operatorname{tg} \theta; \\z &= \lambda_1 + x_{11} \operatorname{tg} \psi; \\ \varphi &= \lambda_6 / z_1; \quad \psi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{x_{21} - x_{11}} \right); \\ \theta &= \operatorname{arctg} \left(\frac{\lambda_3 - \lambda_4}{x_{21} - x_{11}} \right),\end{aligned}\tag{1.8.15}$$

где $\lambda_1 - \lambda_6$ – перемещения опорных точек.

В уравнение движения вместо координат $x, y, z, \varphi, \psi, \theta$ радиус-векторов и матриц подставляют правые части зависимостей (1.8.15), связывающие перемещения опорных точек с шестью координатами. Следует оговориться, что для другой схемы расположения опорных точек зависимости (1.8.15) будут другими.

Теперь, чтобы ввести в уравнение движения фактор, порождающий отклонения движения точки M в координатной системе Σ_1 (см. рис. 1.8.11), необходимо перемещения λ_i каждой опорной точки представить функцией этого фактора. Например (рис. 1.8.17), упругое перемещение λ_i опорной точки детали системы можно представить как функцию ее жесткости, тогда

$$\lambda_{yi} = R_i / j_j,$$

где R_i – реакция в i -й опорной точке от всех сил и моментов, действующих на деталь этой координатной системы; j – жесткость i -й опорной точки.

Чтобы найти реакции в опорных точках, составляют шесть уравнений равновесия статики: $\Sigma P_X = 0$; $\Sigma P_Y = 0$; $\Sigma P_Z = 0$; $\Sigma M_X = 0$; $\Sigma M_Y = 0$; $\Sigma M_Z = 0$.

Жесткость детали в опорных точках рассчитывают или определяют экспериментально. Аналогичным образом включают в уравнение движения другие факторы, такие, как тепловые перемещения, износ, остаточные напряжения, представляя их через перемещения опорных точек. Подставив в уравнение движения (1.8.14) вместо перемещений опорных точек их функции и введя ограничения на переменные в правой части уравнения, получим математическую модель механизма образования геометрических погрешностей.

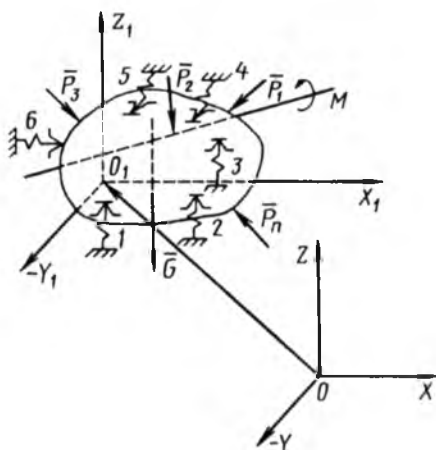


Рис. 1.8.17. Схема действующих сил и моментов в координатной системе Σ_1

В заключение надо отметить следующее. Обработка деталей на станках отличается большим разнообразием методов обработки (точение, растачивание, фрезерование, шлифование, сверление, протягивание и др.) режущего инструмента, приспособлений. Все это влияет на характер механизма образования погрешностей обработки, обуславливает действие тех или иных факторов, доминирование каких-либо из них. Иными словами, в каждом конкретном случае имеется определенная специфика механизма образования погрешностей обработки.

Отсутствие единого подхода к построению модели механизма образования погрешностей обработки породило бесчисленное множество его экспериментальных исследований. На основе этих исследований разработано большое число моделей вероятностно-статистического вида, что не позволяет перейти к существенным обобщениям и в каждом конкретном случае требует построения очередной модели.

Метод координатных систем с деформирующимися связями открывает возможность единого подхода к построению моделей механизма образования погрешностей независимо от метода обработки, типа металлорежущего оборудования, режущего инструмента и приспособления.

Проверка модели на адекватность. Успех применения построенной математической модели для решения задач во многом зависит от степени ее адекватности реальному объекту. Необходимость проверки модели на адекватность объясняется тем, что любая модель всегда лишь

с некоторым приближением описывает поведение реального объекта, так как при принятой идеализации оригинала некоторые его стороны и характеристики оказываются неучтенными.

В задачу проверки модели на адекватность входит сопоставление ее выходных переменных с выходными переменными реального объекта при одних и тех же входных воздействиях

Если в ходе проверки модели на адекватность ошибки, характеризующие точность модели, превосходят ошибки наблюдений, то гипотеза об адекватности модели отклоняется.

Действительные значения выходных переменных реального объекта остаются неизвестными, и сопоставление выходных данных модели производится с наблюдаемыми значениями выходных данных реального объекта. Поэтому установленная степень соответствия модели реальному объекту будет зависеть не только от точности модели, но и от ошибок измерения выходных данных реального объекта.

Поскольку при построении математической модели реального объекта не принимаются во внимание те или иные стороны последнего, постольку эта модель будет описывать поведение объекта с требуемой точностью лишь в какой-то определенной области, ограниченной значениями параметров процесса и значениями характеристик объекта.

В связи с изложенным, проверка модели на адекватность требует решения трех задач: определение требуемой точности модели, определение области, в которой модель обязана "работать" с заданной точностью; разработка методики экспериментального исследования, обеспечивающая получение результатов наблюдений в минимально необходимом объеме с погрешностью в пределах допуска.

Точность модели. Под точностью модели будем понимать степень приближения расчетной величины выходного параметра его наблюдаемому значению. В рассматриваемом случае это будет степень приближения расчетного значения радиус-вектора $\bar{R}_i^p$ в i -й точке поверхности детали измеренному в $\bar{R}_i^n$ этой же точке. Разница $\bar{R}_i^p - \bar{R}_i^n = \Delta\bar{R}_i^m$ будет определять погрешность модели в i -й точке, однако в другой точке поверхности детали эта разница может быть иной. Поэтому оценивать точность модели надо в совокупности точек поверхности детали.

Пользуясь общепринятыми рекомендациями, допуск на отклонение $\Delta\bar{R}^m$ следует устанавливать из расчета 10 % от допуска на точность расчета R_i .

Область применения модели. Механизм образования геометрических погрешностей машины может быть "очерчен" многомерной областью диапазонов изменения факторов, порождающих эти погрешности (рис. 1.8.18).

Проверяемая на адекватность модель всегда включает лишь часть этих факторов. Следовательно, многомерность области модели всегда меньше и будет определяться составом факторов, вошедших в правую часть уравнения относительного движения. Поэтому неправомерно сопоставление выходных показателей модели с выходными показателями реального объекта в любой точке области последнего. Сопоставление

нужно проводить только в тех точках, которые принадлежат одновременно областям модели и реального объекта. Например, если проверяется на адекватность модель механизма образования упругих перемещений элементов машины, то за геометрическую погрешность принимают только ту ее часть, которая образуется упругими перемещениями. В этом случае область модели будет описываться диапазонами изменения силы и жесткости. По мере включения в модель других факторов область ее применения расширяется. Определив область действия модели, следует установить число точек, в которых будет осуществляться проверка на адекватность. С этой целью диапазон изменения фактора разбивается на интервалы. Проверка модели во всех установленных точках позволит выявить область, в которой точность модели соответствует заданной.

Экспериментальное исследование реального объекта. Большое значение для проверки модели на адекватность имеет тщательность проведения экспериментального исследования. Однако проведение экспериментальных исследований с охватом всех точек, как правило, отличается высокой трудоемкостью и длительностью. В связи с этим целесообразно при планировании эксперимента отказаться от полного факторного эксперимента. Тогда проверка модели на адекватность будет сведена к со-

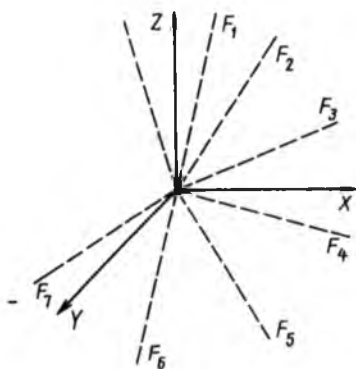


Рис. 1.8.18. Факторы $F_1 - F_n$, действующие в координатной системе

где $\bar{R}_i$ – радиус-вектор i -й точки заданной поверхности; $\bar{R}_{\Phi i}$ – радиус-вектор i -й точки фактической поверхности.

Чтобы установить, какой точке заданной поверхности детали соответствует точка полученной поверхности детали, надо записать уравнение полученной и реальной поверхностей в функции времени или какого-либо другого параметра, производного от фактора времени. Запишем $\bar{R}_{\Phi i}$ и $\bar{R}_i$ поверхности в функции времени, т.е. $\bar{R}_{\Phi i} = f_1(t)$ и $\bar{R}_i = f_2(t)$, где t – параметр времени. Тогда для момента t_i будут известны $\bar{R}_{\Phi i}$ и $\bar{R}_i$, а разницей между ними будет погрешность обработки.

Для определения $\bar{R}_{\Phi i}$ в каждый момент времени надо записать уравнение движения, в правую часть которого в качестве аргументов должны входить действующие факторы, заданные движения заготовки и инструмента, качественные характеристики технологической системы.

В зависимости от формы режущей части инструмента и кинематики относительного движения заготовки и режущего инструмента формирование обработанной поверхности будет определяться не непосредственно как траектория движения режущей поверхности инструмента, а с учетом перекрытия и последействия одних точек режущей поверхности инструмента, следующих за другими.

Иными словами, не все точки режущей поверхности инструмента, участвующие в съеме материала с заготовки, формируют обработанную поверхность. На рис. 1.8.20 показано, что в результате обработки резцом на детали получилась винтовая поверхность. Если будем уменьшать подачу на оборот S , то при определенном ее значении вспомогательная режущая кромка резца начнет срезать часть поверхности, которая была сформирована главной режущей кромкой резца во время предыдущего оборота заготовки.

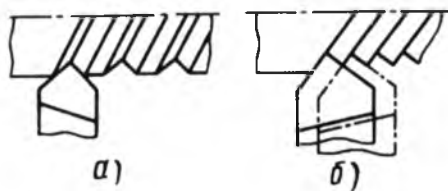


Рис. 1.8.20. Поверхности детали, сформированные резцом:

а – при $S = 10$ мм/об; б – при $S = 0,5$ мм/об

Таким образом, если строго формулировать задачу описания поверхности детали, получаемой в результате обработки, то надо вести расчет траектории не одной точки режущей поверхности инструмента, а всей совокупности точек. Затем, учитывая кинематику относительного движения заготовки и инструмента с учетом формы режущей части последнего, надо рассчитать поверхность, которая будет получена в результате обработки, и затем переходить к определению погрешности детали.

При таком расчете можно определить не только размер и макрогеометрию, но и волнистость и шероховатость обработанной поверхности. Однако при этом значительно усложнится математический аппарат и существенно повысится трудоемкость вычислений.

В ряде случаев нет необходимости в таком точном расчете поверхности. Там, где это допустимо, целесообразно идти на упрощения. Например, рассчитывать траекторию движения не поверхности, а линии или точки. В качестве примера можно привести обработку детали резцом или шлифовальным кругом, когда для описания макрогеометрии обработанной поверхности, обусловленной кинематикой движения, достаточно записать уравнение движения режущих кромок. Если известно уравнение линии режущей кромки, то достаточно записать уравнение движения одной или нескольких ее точек. Например, при обработке резцом линию режущих кромок можно представить как ломаную, состоящую из двух отрезков AM и BM (рис. 1.8.21), сходящихся в одной точке. В этом случае уравнение режущих кромок имеет вид уравнения прямой линии: $y_n = kx$.

Для прямой AM

$$k = k_1 \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (1.8.16)$$

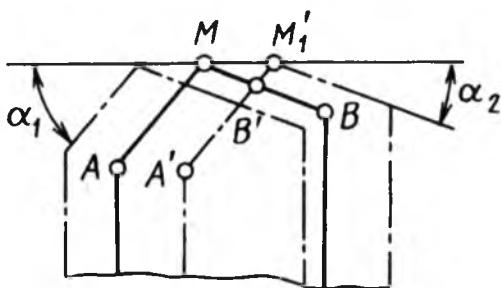


Рис. 1.8.21. Определение режущих кромок резца, участвующих в формировании поверхности

для прямой BM

$$k = k_2 \operatorname{tg} \alpha_2, \quad (1.8.17)$$

где k – угловой коэффициент прямой линии.

Чтобы описать полученную в результате обработки поверхность детали, необходимо вывести уравнения относительного движения технологических баз детали и режущих кромок инструмента. С этой целью, выбрав одну из точек, принадлежащих линии режущих кромок, выводится уравнение движения этой точки. Для рассматриваемого случая удобно в качестве такой точки принять точку M – вершину резца. Теперь, подставляя в выведенное уравнение движения выражение y_n , получим уравнение поверхности детали, образуемой перемещением ломаной линии AMB в координатной системе детали.

Для рассматриваемого случая в целях простоты решения задачи удобнее сначала подставить в уравнение движения выражение y_n согласно равенству (1.8.16), а потом в равенство (1.8.17). Тогда, исключив из полученных уравнений движения

$$\begin{cases} x_3 = f_1(x_n, y_n, z_n, t); \\ y_3 = f_2(x_n, y_n, z_n, t); \\ z_3 = f_3(x_n, y_n, z_n, t), \end{cases}$$

параметр x_n , получим уравнения поверхности в неявном виде:
образованной линией AM при $\varphi = \varphi$:

$$f_1(x_3, y_3, z_3) = 0; \quad (1.8.18)$$

образованной линией BM при $\varphi = \varphi$:

$$f_2(x_3, y_3, z_3) = 0.$$

Линия пересечения этих поверхностей представляет собой траекторию движения точки M . Из рис. 1.8.21 следует, что не все точки линии режущих кромок формируют полученную поверхность детали. Чтобы найти участок линии режущих кромок инструмента, точки которого участвуют в формировании поверхности детали, надо решить систему уравнений (1.8.18).

Решив систему уравнений

$$\begin{cases} f_1(x_3, y_3, z_3) = 0 & \text{при } \varphi = \varphi; \\ f_2(x_3, y_3, z_3) = 0 & \text{при } \varphi = \varphi + 2\pi, \end{cases}$$

получим координаты точки A' (см. рис. 1.8.21) как точку пересечения двух прямых AM и BM , где положение AM определяется положением главной режущей кромки при φ , а положение BM определяется положением вспомогательной режущей кромки на оборот позже. Для того чтобы найти координаты точки B' , надо совместно решить систему уравнений

$$\begin{cases} f_1(x_3, y_3, z_3) = 0 & \text{при } \varphi = \varphi; \\ f_2(x_3, y_3, z_3) = 0 & \text{при } \varphi = \varphi - 2\pi. \end{cases}$$

Теперь для каждого момента времени t можно рассчитать радиус-векторы точек A' , M' , B' и построить получаемую поверхность детали. Для этого в уравнения поверхностей надо подставить координаты точек режущей кромки инструмента.

Известно, что погрешность обработки представляет собой векторную сумму погрешностей статической и динамической настроек размерных и кинематических цепей технологической системы.

Образование погрешности обработки детали в i -й точке можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 1.8.22.

В координатной системе, построенной на технологических базах заготовки, положение M_i -й точки поверхности детали, заданной чертежом, определяется радиус-вектором $\bar{R}_i$. После осуществления статической настройки технологической системы положение вершины резца в этой же системе координат будет определяться радиус-вектором $\bar{R}_{ci}$. Вершины

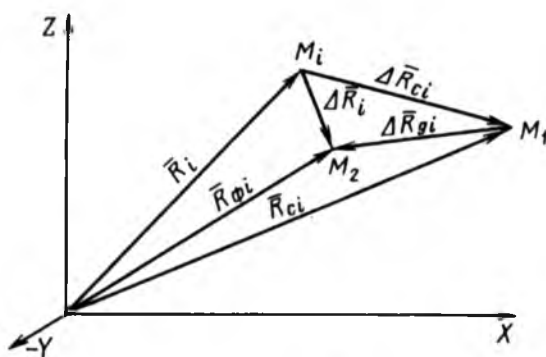


Рис. 1.8.22. Схема формирования $\Delta \bar{R}$ детали как совокупности погрешностей статической и динамической настроек

радиус-векторов $\bar{R}_i$ и $\bar{R}_{ci}$ не совпадают из-за действия многочисленных факторов, т.е. появляется погрешность статической настройки $\Delta\bar{R}_{ci} = \bar{R}_i - \bar{R}_{ci}$.

Иными словами, если бы произошла обработка заготовки, то положение i -й точки оказалось бы в точке M_1

В результате последующей динамической настройки технологической системы положение вершины резца изменится на величину $\Delta\bar{R}_{di}$ и окажется в точке M_2 . Тогда после обработки заготовки фактическое положение M_i -й точки полученной поверхности окажется в точке M_2 , определяемой радиус-вектором $\bar{R}_{\Phi i}$, а погрешность обработки $\Delta\bar{R}_i$ определится из равенства

$$\Delta\bar{R}_i = \bar{R}_i - \bar{R}_{\Phi i}. \quad (1.8.19)$$

В то же время

$$\bar{R}_{\Phi i} = \bar{R}_{ci} - \Delta\bar{R}_{di}. \quad (1.8.20)$$

Тогда, подставляя в равенство (1.8.19) вместо $\bar{R}_{\Phi i}$ правую часть равенства (1.8.20), получим

$$\Delta\bar{R}_i = \bar{R}_i \pm \bar{R}_{ci} \pm \Delta\bar{R}_{di}.$$

В связи с изложенным, рассмотрим построение математических моделей статической и динамической настройки технологической системы. С целью упрощения математической модели за основу примем уравнение относительного движения технологических баз заготовки и вершины резца.

1.8.4.1. Построение математической модели механизма образования погрешности статической настройки

Статическая настройка технологической системы заключается в установлении требуемого относительного положения режущих кромок резца относительно технологических баз заготовки и их относительного движения в условиях отсутствия рабочих нагрузок без съема материала с заготовки. Однако непосредственное измерение относительного положения режущих кромок резца и технологических баз заготовки не представляется возможным из-за отсутствия доступа к технологическим базам

заготовки. Поэтому точность статической настройки проверяется посредством измерения точности установки резца и заготовки относительно соответствующих баз станка (БС).

БС универсального токарного станка следующие: для резца выступают направляющие станины БС_р, по которым перемещается суппортная группа вместе с резцом; для заготовки БС_з – внутренние отверстия подшипников шпинделя, относительно которых вращается шпиндель вместе с заготовкой. Отсюда размер статической настройки технологической системы $\bar{R}_{ci}$ будет складываться из радиус-векторов установки резца, заготовки и расстояния между базами станка БС_р и БС_з.

Построение указанных математических моделей осуществляется в соответствии с цепочкой причинно-следственных связей механизма образования погрешностей обработки деталей (см. рис. 1.8.4).

Под погрешностью статической настройки технологической системы $\Delta \bar{R}_{ci}$ в i -й точке детали будем понимать отклонение радиус-вектора статической настройки $\bar{R}_{ci}$ от радиус-вектора детали $\bar{R}_i$, определяемое для одного и того же j -го момента времени и отсчитанное в системе координат, построенной на технологических базах заготовки (рис. 1.8.22). Под размером динамической настройки технологической системы $\Delta \bar{R}_{di}$ будем понимать разницу между радиус-вектором $\bar{R}_{fi}$ в i -й точке полученной поверхности детали и радиус-вектором статической настройки $\bar{R}_{ci}$, определяемые для одного и того же момента времени и отсчитанные в системе координат, построенной на технологических базах заготовки.

В результате статической настройки режущий инструмент и заготовка должны занять требуемое исходное (начальное) относительное положение и без рабочих нагрузок воспроизводить заданный закон относительного движения.

Начальное относительное положение режущего инструмента и заготовки обеспечивается с помощью размерных цепей, а закон относительного движения – с помощью кинематических цепей. Вследствие воздействия различных факторов фактическая траектория движения и начальное положение резца будут отличаться от заданных.

В процессе изготовления деталей на станках статическая настройка может неоднократно нарушаться, например, при смене заготовки или замене режущего инструмента. Так, в условиях единичного и мелкосерийного производств в процессе обработки одной заготовки происходит

многократная смена режущего инструмента отдельно или совместно с инструментальным блоком.

В зависимости от технических, технологических и организационных причин сменными элементами технологической системы, установка которых влияет на точность статической настройки, могут быть не только заготовка и режущий инструмент, но и приспособление, стол, инструментальный блок, шпиндельная бабка. К примеру, в условиях крупносерийного и массового производства во время обработки партии деталей происходит смена заготовки или спутника с заготовкой при постоянном режущем инструменте.

При использовании агрегатных станков в среднесерийном производстве, чтобы снизить затраты времени на переустановку и настройку режущего инструмента, автоматически меняют шпиндельную коробку при переходе на обработку заготовки другой детали.

Статическую настройку технологической системы осуществляют в два этапа. Сначала настраивают кинематические цепи на заданный закон относительного движения баз под установку заготовки и инструмента, затем устанавливают заготовку и режущий инструмент. Такая последовательность объясняется тем, что при установленных заранее заготовке и инструменте нельзя осуществить заданный закон относительного движения без съема материала с заготовки.

Разработка модели статической настройки токарного станка начинается с построения эквивалентной схемы (рис. 1.8.23, *а*) на основе размерной цепи, замыкающим звеном которой является радиус-вектор $\vec{r}_m$, соединяющий начало системы координат Σ_n , построенной на вспомогательных базах трехкулачкового патрона, используемых для базирования заготовки, и вершину (точка M) резца.

Построив координатные системы на шпинделе $\Sigma_{ш}$ и Σ_i, Σ_{i+1} , построенных на основных базах звеньев кинематической цепи вращения шпинделя и на резцедержавке Σ_p и Σ_j, Σ_{j+1} , построенных на основных базах звеньев кинематической цепи поступательного движения резцедержавки, получим эквивалентную схему статической настройки (рис. 1.8.23, *а*). Запишем уравнение относительного движения точки M резца в системе Σ_n в соответствии с методикой вывода уравнения движения, приведенной в п. 1.8.3.

Координатные системы эквивалентной схемы имеют не только заранее заданные перемещения или вращения, но и случайные перемещения и повороты в результате действия многочисленных факторов.

Приведем движения всех кинематических звеньев к поступательно-му движению системы Σ_p и вращательному движению системы $\Sigma_{\text{ш}}$. Тогда эквивалентная схема примет вид, показанный на рис. 1.8.23, б. Для этой эквивалентной схемы уравнение движения имеет вид:

$$\bar{r}_{\text{мс}} = M_p^{-1} M_{\text{ш}}^{-1} M_{\text{ш}}^{-1} [M_{\text{и}} M_p \bar{r}_{\text{и}} + M_p (\bar{r}_p + \bar{S}_p) - M_{\text{ш}} M_{\text{ш}} \bar{r}_{\text{ш}} + \bar{r}_j - \bar{r}_i], \quad (1.8.21)$$

где $\bar{r}_{\text{мс}}$ – радиус-вектор статической настройки; $M_{\text{ш}}^{-1}$ – матрица поворота $\Sigma_{\text{ш}}$, обеспечиваемого кинематикой станка; $\bar{S}_p$ – вектор поступательного движения системы Σ_p , обеспечиваемого кинематикой станка; M_p^{-1} – матрица поворотов системы Σ_p в системе $\Sigma_{\text{ш}}$; $\bar{r}_{\text{и}}$, $\bar{r}_{\text{ш}}$, $\bar{r}_i$, $\bar{r}_j$, $\bar{r}_p$ – радиус-векторы соответственно точки M в системе $\Sigma_{\text{и}}$, точки $O_{\text{п}}$ в системе $\Sigma_{\text{ш}}$, точки $O_{\text{ш}}$ в системе направляющих станины $\Sigma_{\text{с}}$, точки O_p в системе $\Sigma_{\text{с}}$, точки $O_{\text{и}}$ в системе Σ_p ; $M_{\text{ш}}^{-1}$, $M_{\text{и}}$, M_p – матрицы поворотов соответственно системы $\Sigma_{\text{ш}}$ в системе $\Sigma_{\text{с}}$, системы инструмента $\Sigma_{\text{и}}$ в системе Σ_p , системы Σ_p в системе $\Sigma_{\text{с}}$.

В полученном уравнении движения режущего инструмента (без рабочих нагрузок) в системе координат патрона аргументами являются размерные параметры $\bar{r}_{\text{и}}$, $\bar{r}_{\text{ш}}$, $\bar{r}_i$, $\bar{r}_j$, $\bar{r}_p$, $M_{\text{п}}$, $M_{\text{ш}}$, $M_{\text{и}}$, M_p и кинематические параметры $M_{\text{ш}}$ и $\bar{S}_p$.

Погрешности, вызывающие отклонения статической настройки, можно разделить на две группы: геометрические неточности звеньев кинематических и размерных цепей и их положения и факторы, вызывающие погрешности положения этих звеньев.

Введем в полученное уравнение относительного движения факторы, вызывающие погрешность относительного движения. В основном это геометрические неточности самих звеньев кинематических и размерных цепей и их положения. Если эти погрешности известны, то их влияние может быть учтено через изменение положения соответствующих опорных точек. Изменение же положения опорных точек в свою очередь вызывает отклонения соответствующих линейных или угловых параметров координатной системы и, как следствие, нарушение заданного относительного движения.

Наибольшее влияние на погрешность статической настройки обычно оказывают погрешности установки сменных элементов и, в первую очередь, заготовки, когда она базируется необработанными поверхностями.

На погрешность статической настройки существенное влияние оказывают и упругие перемещения, образующиеся под действием сил зажима и сил тяжести. Однако в механизме их упругих перемещений имеется специфика. Если в процессе обработки действующая сила резания влияет на все звенья размерной цепи, то при установке, например, заготовки силу зажима воспринимают только сама заготовка и приспособление. На остальные звенья размерной цепи действие этих сил не распространяется.

1.8.4.2. Построение математической модели механизма образования погрешности динамической настройки

В задачу динамической настройки технологической системы входит достижение заданной точности относительного движения технологических баз заготовки и режущих кромок инструмента в процессе съема материала.

Чтобы упростить модель, будем рассматривать погрешность обработки в результате перемещений и поворотов звеньев размерной цепи, опустив кинематические звенья.

Запишем уравнение движения вершины резца (точка M) в координатной системе заготовки (Σ_z) в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 1.8.24), отличающееся от эквивалентной схемы статической настройки наличием Σ_z , построенной на технологических базах заготовки:

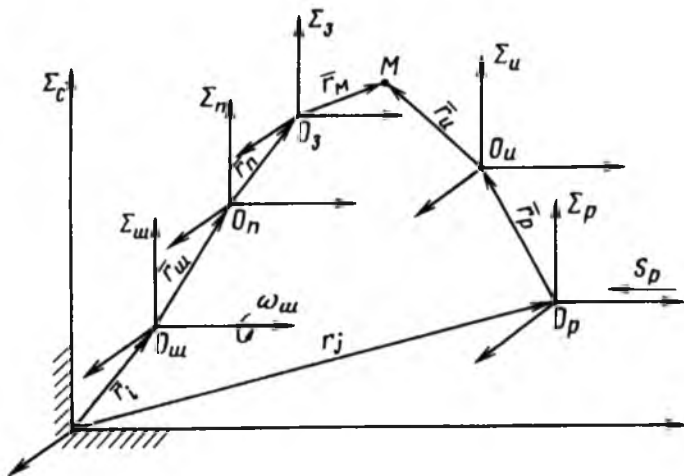


Рис. 1.8.24. Эквивалентная схема динамической настройки токарного станка

$$\begin{aligned} \bar{r}_{\text{мд}} = M_3^{-1} M_{\text{п}}^{-1} M_{\text{ш}}^{-1} M_{\omega\text{ш}}^{-1} [M_{\text{п}} M_{\text{ш}} M_{\omega\text{ш}} M_{\text{п}} \bar{r}_{\text{п}} + M_{\text{ш}} M_{\omega\text{ш}} \bar{r}_{\text{ш}} - \\ - M_{\text{и}} M_{\text{р}} \bar{r}_{\text{и}} - M_{\text{р}} (\bar{r}_{\text{р}} + \bar{S}_{\text{р}}) + \bar{r}_{\text{и}} - \bar{r}_{\text{л}}], \end{aligned} \quad (1.8.22)$$

где M_3^{-1} – матрица поворотов системы Σ_3 в системе $\Sigma_{\text{п}}$; $\bar{r}_{\text{мд}}$ – радиус-вектор динамической настройки.

Следующий шаг в построении модели – ввод в уравнение (1.8.22) факторов, стремящихся вызвать отклонение $\bar{r}_{\text{мд}}$.

Наибольшее влияние на погрешность динамической настройки оказывают упругие перемещения, износ и тепловые перемещения элементов технологической системы. Технологическая система токарного станка во время обработки находится под воздействием различных сил и их моментов. Из всех сил, действующих в технологической системе во время обработки, наибольшее влияние на упругие перемещения оказывают силы резания $\bar{P}$, силы инерции, масса заготовки и сила $P_{\text{п}}$, действующая в том случае, если вращение заготовке передается односторонним поводком.

Вектор силы резания действует в зоне контакта инструмента с заготовкой. Условимся считать, что точка приложения силы $\bar{P}$ совпадает с вершиной режущего инструмента.

Величина и направление вектора силы резания $\bar{P}$ подсчитывается по зависимостям, установленным теорией резания. Например, при точении

$$\begin{cases} P_z = C_{Pz} t^{xz} s^{yz} v^{nz} K_z; \\ P_y = C_{Py} t^{xy} s^{yy} v^{ny} K_y; \\ P_x = C_{Px} t^{xx} s^{yx} v^{nx} K_x, \end{cases} \quad (1.8.23)$$

где P_z, P_y, P_x – проекции вектора $\bar{P}$ на соответствующие координатные оси системы; C_{Pi} – коэффициент, учитывающий условия обработки; t – глубина резания; s – продольная подача; K_i – коэффициент, учитывающий геометрию резца, материал заготовки и др.; v – скорость резания; xz, yz, nz и др. – показатели степени.

Сила $P_{\text{п}}$, передаваемая односторонним поводком, приложена в точке контакта поводкового пальца с хомутиком. Координаты этой точки в системе Σ_3 на протяжении обработки детали остаются практически неизменными. Величина силы подсчитывается из равенства моментов

$$P_{\text{п}} \rho = P_z r,$$

откуда

$$P_n = \frac{r}{\rho} P_z,$$

где r – расстояние между вершиной резца и осью вращения шпинделя;
 ρ – расстояние между центром поводка и осью вращения шпинделя.

Крутящий момент M_k приложен по оси вращения $O_{\text{ш}}X_{\text{ш}}$.

Силы инерции, возникающие в системе из-за вращения неуравновешенных масс, в соответствии с положениями теоретической механики могут быть приведены к некоторой точке O и заменены главным вектором – силой $\overline{\Phi}^r$ и главным моментом сил инерции, который обозначим через $\overline{M}^r$. Масса заготовки G действует в точке C – центре тяжести заготовки.

Под действием указанных выше сил и моментов нарушается заданное относительное положение систем Σ_z , $\Sigma_{\text{ш}}$, Σ_n (координатную систему Σ_n решено не принимать во внимание, так как базирование заготовки осуществляется в центрах). Найдем аналитические выражения относительных перемещений этих координатных систем. Определим упругие перемещения системы $\Sigma_{\text{ш}}$ относительно системы Σ_c , принимаемой за неподвижную. С этой целью запишем аналитические выражения действующих в технологической системе сил, моментов и координат точек их приложения (рис. 1.8.25), которые вызывают перемещения системы $\Sigma_{\text{ш}}$. Сила резания $\overline{P} \{P_{x_n}, P_{y_n}, P_{z_n}\}$, точка приложения $M_n \{x_n, y_n, z_n\}$. Сила инерции $\overline{\Phi}^r \{\Phi_{x_{\text{ш}}}^r, \Phi_{y_{\text{ш}}}^r, \Phi_{z_{\text{ш}}}^r\}$, точка приложения $O^r \{x_{\text{ш}}^r, y_{\text{ш}}^r, z_{\text{ш}}^r\}$. Момент силы инерции $\overline{M}^r \{M_{x_{\text{ш}}}^r, M_{y_{\text{ш}}}^r, M_{z_{\text{ш}}}^r\}$, точка приложения $O^r \{x_{\text{ш}}^r, y_{\text{ш}}^r, z_{\text{ш}}^r\}$. Крутящий момент $M_k \{M_{k_{\text{ш}}}, 0, 0\}$ приложен по оси $O_{\text{ш}}X_{\text{ш}}$. Сила тяжести $G \{G_x, G_y, G_z\}$, точка приложения – центр тяжести в системе $\Sigma_x \{x_{\text{ш}}, y_{\text{ш}}, z_{\text{ш}}\}$. Величины $P_{x_n}, P_{y_n}, P_{z_n}$ рассчитываются по формулам (1.8.23), координаты x_n, y_n, z_n определяются заданным движением инструмента.

На основании вышеприведенных данных найдем реакции в опорах системы $\Sigma_{\text{ш}}$, перемещения опор и отклонения относительного движения. Для нахождения реакций в опорах сначала определим проекции вышеперечисленных сил и моментов на координатные оси $\Sigma_{\text{ш}}$ и Σ_c (см. рис. 1.8.25).

Сила резания $\overline{P}$ действует в системе Σ_n : $P_{x_n}, P_{y_n}, P_{z_n}$, ее проекции:

– в системе Σ_{ω}

$$\left. \begin{aligned} x_{\omega} &= x m_{11} + y m_{12} + z m_{13} - (x_{O_{\omega}} m_{11} + y_{O_{\omega}} m_{12} + z_{O_{\omega}} m_{13}); \\ y_{\omega} &= x m_{21} + y m_{22} + z m_{23} - (x_{O_{\omega}} m_{21} + y_{O_{\omega}} m_{22} + z_{O_{\omega}} m_{23}); \\ z_{\omega} &= x m_{31} + y m_{32} + z m_{33} - (x_{O_{\omega}} m_{31} + y_{O_{\omega}} m_{32} + z_{O_{\omega}} m_{33}). \end{aligned} \right\}$$

Сила инерции $\overline{\Phi}^r$ действует в системе Σ_{ω} : $\Phi_{x\omega}^r$, $\Phi_{y\omega}^r$, $\Phi_{z\omega}^r$, ее проекции в системе Σ_c :

$$\left. \begin{aligned} \Phi_x^r &= \Phi_{x\omega}^r m_{11} + \Phi_{y\omega}^r m_{21} + \Phi_{z\omega}^r m_{31}; \\ \Phi_y^r &= \Phi_{x\omega}^r m_{12} + \Phi_{y\omega}^r m_{22} + \Phi_{z\omega}^r m_{32}; \\ \Phi_z^r &= \Phi_{x\omega}^r m_{13} + \Phi_{y\omega}^r m_{23} + \Phi_{z\omega}^r m_{33}. \end{aligned} \right\}$$

Координаты точки приложения O^r – силы инерции. Точка O^r расположена в системе Σ_{ω} : x_{ω}^r , y_{ω}^r , z_{ω}^r , ее проекции в системе Σ_c :

$$\left. \begin{aligned} x^r &= x_{\omega}^r m_{11} + y_{\omega}^r m_{21} + z_{\omega}^r m_{31} + x_{O_{\omega}}; \\ y^r &= x_{\omega}^r m_{12} + y_{\omega}^r m_{22} + z_{\omega}^r m_{32} + y_{O_{\omega}}; \\ z^r &= x_{\omega}^r m_{13} + y_{\omega}^r m_{23} + z_{\omega}^r m_{33} + z_{O_{\omega}}. \end{aligned} \right\}$$

Если точка O^r лежит на оси $O_{\omega}x_{\omega}$, то

$$\begin{aligned} x^r &= x_{\omega}^r m_{11}; \\ y^r &= x_{\omega}^r m_{12}; \\ z^r &= x_{\omega}^r m_{13}. \end{aligned}$$

Сила тяжести G приложена в системе Σ_3 , ее проекции в системе Σ_c

$$\left. \begin{aligned} G_{x\omega} &= G_x m_{11} + G_y m_{12} + G_z m_{13}; \\ G_{y\omega} &= G_x m_{21} + G_y m_{22} + G_z m_{23}; \\ G_{z\omega} &= G_x m_{31} + G_y m_{32} + G_z m_{33}. \end{aligned} \right\}$$

Координаты точки приложения силы тяжести G – точка C . Точка C расположена в системе Σ_3 : x_{3c} , y_{3c} , z_{3c} ;

в системе $\Sigma_{ш}$

$$\left. \begin{aligned} x_{шс} &= x_{3с}a_{11} + y_{3с}a_{21} + z_{3с}a_{31} + x_{ш03}, \\ y_{шс} &= x_{3с}a_{12} + y_{3с}a_{22} + z_{3с}a_{32} + y_{ш03}, \\ z_{шс} &= x_{3с}a_{13} + y_{3с}a_{23} + z_{3с}a_{33} + z_{ш03}. \end{aligned} \right\}$$

Момент сил инерции $\overline{M}^r$ действует в системе $\Sigma_{ш}$: $M_{xш}^r, M_{yш}^r, M_{zш}^r$, его проекции в системе Σ_c :

$$\left. \begin{aligned} M_x^r &= M_{xш}^r m_{11} + M_{yш}^r m_{21} + M_{zш}^r m_{31}; \\ M_y^r &= M_{xш}^r m_{12} + M_{yш}^r m_{22} + M_{zш}^r m_{32}; \\ M_z^r &= M_{xш}^r m_{13} + M_{yш}^r m_{23} + M_{zш}^r m_{33}. \end{aligned} \right\}$$

Запишем уравнения равновесия статики и найдем реакции в опорах

$$\Sigma F_x = 0; \Sigma M_x = 0;$$

$$\Sigma F_y = 0; \Sigma M_y = 0;$$

$$\Sigma F_z = 0; \Sigma M_z = 0;$$

$$\Sigma F_x = 0, R_{5ш} + G_x + \Phi_x^r + P_x = 0, \text{отсюда}$$

$$R_{5ш} = -P_x - \Phi_x^r - G_x;$$

$$\Sigma M_{xш} = 0; M_k + P_{zш} y_n - P_{yш} z_n + G_{zш} y_n - G_{yш} z_{ш} + M_{xш}^r = 0;$$

$$M_k = P_{yш} z_{ш} - P_{zш} y_{ш} + G_{yш} z_{ш} - G_{zш} y_{ш} - M_{xш}^r;$$

$$\Sigma M_{yш} = 0; P_x(z - z_{1ш}) - P_z(x - x_{1ш}) + G_x(z_c - z_{1ш}) - G_z(x_c - x_{1ш}) + \Phi_x^r(z^r - z_{1ш}) - \Phi_x^r(x^r - x_{1ш}) + M_{xy} + M_y^r - R_{2ш}(x_{2ш} - x_{1ш}) = 0;$$

$$R_{2ш} = \frac{1}{(x_{2ш} - x_{1ш})} [P_x(z - z_{1ш}) - P_z(x - x_{1ш}) + G_x(z_c - z_{1ш}) - G_z(x_c - x_{1ш}) + \Phi_x^r(z^r - z_{1ш}) - \Phi_x^r(x^r - x_{1ш}) + M_{xy} + M_y^r];$$

$$\Sigma F_z = 0; P_z + G_z + \Phi_z^r + R_{1ш} + R_{2ш} = 0;$$

$$R_{1ш} = -(P_z + G_z + \Phi_z^r + R_{2ш});$$

$$\Sigma M_{zш} = 0; P_y(x - x_{1ш}) - P_x(y - y_{1ш}) + G_y(x_c - x_{1ш}) - G_x(y_c - y_{1ш}) + \\ + \Phi_y^r(x^r - x_{1ш}) - \Phi_x^r(y^r - y_{1ш}) + M_z^r + M_{kz} + R_{4ш}(x_{2п} - x_{1ш}) = 0;$$

$$R_{4ш} = \frac{P_y(x - x_{1ш}) - P_x(y - y_{1ш}) + G_y(x_c - x_{1ш}) - G_x(y_c - y_{1ш}) + \\ + \Phi_y^r(x^r - x_{1ш}) - \Phi_x^r(y^r - y_{1ш}) + M_{kz} + M_z^r}{x_{2п} - x_{1ш}} \rightarrow$$

$$\Sigma F_y = 0; P_y + G_y + \Phi_y^r + R_{3ш} + R_{4ш} = 0;$$

$$R_{3ш} = -(P_y + G_y + \Phi_y^r + R_{4ш}).$$

Аналогично определяются реакции в опорных точках других координатных систем эквивалентной схемы.

Значения жесткости опорных точек для получения более высокой точности модели рекомендуется определять экспериментальным методом. Например, значения жесткости опорных точек координатной системы $\Sigma_{ш}$ шпинделя определяются измерением упругих перемещений шпинделя в соответствующих направлениях при его нагружении в тех же направлениях. Далее, пользуясь полученными величинами, рассчитываются значения жесткости опорных точек. Зная реакции в опорных точках и их жесткости, упругие перемещения λ_i опорных точек рассчитываются по формуле

$$\lambda_i = R_i / j_i,$$

где R_i и j_i – реакция и жесткость i -й опорной точки.

Теперь можно определить перемещения Δx_i , Δy_i , Δz_i и повороты $\Delta \varphi_i$, $\Delta \psi_i$, $\Delta \theta_i$ координатных систем Σ_3 , $\Sigma_{ш}$, $\Sigma_{и}$. Ниже приведены формулы для расчета этих величин:

$$\Delta x_{ш03} = \lambda_{53};$$

$$\Delta y_{ш03} = \lambda_{33} + x_{313} \operatorname{tg} \Delta \theta_3;$$

$$\Delta z_{ш03} = \lambda_{13} + x_{313} \operatorname{tg} \Psi_3;$$

$$\Delta \varphi_3 = \frac{\lambda_{13}}{z_{313}};$$

$$\Delta \Psi_3 = \arctg \left(\frac{\lambda_{13} - \lambda_{23}}{x_{323} - x_{313}} \right);$$

$$\Delta\theta_3 = \arctg \left(\frac{\lambda_{33} - \lambda_{43}}{x_{323} - x_{313}} \right);$$

$$\Delta x_{0ш} = \lambda_{5ш};$$

$$\Delta y_{0ш} = \lambda_{3ш} + x_{ш1ш} \operatorname{tg} \Delta\theta_{ш};$$

$$\Delta z_{0ш} = \lambda_{1ш} + x_{ш1ш} \operatorname{tg} \Psi_{ш};$$

$$\Delta\varphi_{ш} = 0;$$

$$\Delta\Psi_{ш} = \arctg \left(\frac{\lambda_{1ш} - \lambda_{2ш}}{x_{ш2ш} - x_{ш1ш}} \right);$$

$$\Delta\theta_{ш} = \arctg \left(\frac{\lambda_{3ш} - \lambda_{4ш}}{x_{ш2ш} - x_{ш1ш}} \right);$$

$$\Delta x_{0и} = 0;$$

$$\Delta y_{0и} = \lambda_{3и} + x_{и1и} \operatorname{tg} \Delta\theta_{и};$$

$$\Delta z_{0и} = \lambda_{1и} + x_{и1и} \operatorname{tg} \Psi_{и};$$

$$\Delta\varphi_{и} = \arctg \left(\frac{\lambda_{1и} - \lambda_{5и}}{x_{и6и} - x_{и3и}} \right);$$

$$\Delta\Psi_{и} = \arctg \left(\frac{\lambda_{1и} - \lambda_{2и}}{x_{и4и} - x_{и1и}} \right);$$

$$\Delta\theta_{и} = \arctg \left(\frac{\lambda_{3и} - \lambda_{4и}}{x_{и4и} - x_{и1и}} \right).$$

Подставив в (1.8.22) отклонения параметров положения координатных систем, можно рассчитать отклонения радиус-вектора точек поверхности детали, вызванные упругими перемещениями технологической системы.

При обработке нежестких валов большую долю суммарных упругих перемещений составляет прогиб вала под действием силы резания. Чтобы учесть прогиб вала в расчетах приращения радиус-вектора детали, надо представить прогиб вала как дополнительное перемещение координатной системы Σ_3 относительно системы $\Sigma_{ш}$ путем введения дополнительных

слагаемых в выражение координат $u_{ш03}$ и $z_{ш03}$, т.е. в уравнениях относительного движения $u_{ш03}$ и $z_{ш03}$ должны быть заменены величинами $u'_{ш03}$ и $z'_{ш03}$, где $u'_{ш03} = u_{ш03} + f_{3y}$; $z'_{ш03} = z_{ш03} + f_{3x}$.

При обработке гладкого вала величина его прогиба по длине проходит из-за неравномерной жесткости будет изменяться и может быть найдена по (1.6.7). Однако в (1.67) не учтен фактор переменной массы, имеющий место при обработке вала, когда по мере съема материала заготовки момент инерции J меняется и, следовательно, изменяется жесткость детали и величина прогиба. Исследования показали, что ошибка в расчетах величины прогиба по этой формуле может достигать 70 %.

Для расчета величины прогиба вала с учетом изменения его момента инерции по мере снятия материала предлагают расчет по (1.6.8).

1.8.5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА СБОРКИ

Основными выходными показателями процесса сборки являются:

- точность относительного положения или движения собранных деталей;
- точность значений натяга в неподвижных соединениях и зазора в подвижных соединениях.

Ниже рассматривается методика математического описания точности положения смонтированной детали, характеризуемого показателями, основные из которых приведены в табл. 1.8.1.

Среди факторов, вызывающих геометрические погрешности сборки изделия, наибольшее влияние оказывают геометрические неточности деталей, поступающих на сборку, а также упругие и тепловые перемещения собираемых деталей, сборочных единиц и элементов самой технологической сборочной системы.

К наиболее распространенным показателям, характеризующим точность сборочных единиц, содержащих вращающиеся детали, относятся радиальное биение и биение в осевом направлении, а для деталей, перемещающихся поступательно, – прямолинейность движения.

Упругие деформации деталей и сборочных единиц в процессе их соединения возникают под действием сил зажима, силы тяжести самих деталей и в результате перераспределения остаточных напряжений.

На точность положения детали оказывает существенное влияние последовательность приложения силового замыкания. Механизм его влияния заключается в том, что при последовательном применении очередной силы приложенные ранее силы и вызванные ими силы трения и их мо-

менты в определенной степени препятствуют ее действию. Этот фактор приобретает существенное значение, когда к точности положения монтируемой детали предъявляются высокие требования.

В результате наличия погрешностей формы сопрягаемых поверхностей неправильная последовательность приложения силового замыкания вызывает дополнительные упругие перемещения деталей.

Пусть сборка изделия осуществляется на технологической сборочной системе. При сборке наличие геометрических погрешностей собираемых деталей, силы, действующие в процессе сборки, выделение теплоты, наличие вибраций в технологической системе — все это нарушает заданное относительное движение собираемых деталей.

С помощью эквивалентной схемы технологической сборочной системы механизм формирования геометрических погрешностей сборки можно рассматривать как результат пространственных перемещений и поворотов координатных систем, построенных на деталях технологической системы, вошедших своими размерами в размерную цепь сборочной технологической системы.

Этапы построения модели те же, что и при построении модели процесса образования погрешностей обработки заготовки на станке. Однако в содержании этих этапов есть некоторые отличия.

Постановка задачи. В отличие от процесса обработки заготовки, когда точность обработки оценивается точностью траектории движения режущих кромок инструмента в координатной системе заготовки, точность сборки соединения характеризуется точностью конечного относительного положения собранных деталей. При этом в ряде случаев безразлично, какой будет траектория их относительного движения при сборке.

Требования, которые необходимо обеспечить при сборке соединения, могут быть различными. Если требуется обеспечить герметичность соединения, то необходимо, чтобы по периметру контакта сопрягаемых поверхностей отсутствовал зазор. Если собирают две детали, входящие своими размерами в конструкторскую размерную цепь изделия, то в результате их сборки должна быть достигнута точность положения комплекта вспомогательных баз присоединяемой детали или ее рабочих поверхностей относительно основных баз детали, к которой ее присоединяют. Возьмем, к примеру, сборку токарного станка. В результате его сборки должно быть обеспечено совпадение центра передней и задней бабки в двух плоскостях. При установке пиноли в корпус задней бабки необходимо обеспечить требуемое положение оси отверстия пиноли (ось пересечения координатных плоскостей вспомогательного комплекта баз)

относительно комплекта основных баз (основание и поперечный паз) корпуса задней бабки.

Как известно, в общем случае точность относительного положения двух собранных деталей характеризуется матрицей M трех поворотов и радиус-вектором $\bar{R}$, определяющим положение начала координатной системы, принадлежащей присоединяемой детали, в системе координат, построенной на поверхностях детали, к которой ее присоединяют. Иногда, в зависимости от требований, предъявляемых к точности присоединяемой детали, точность положения можно оценивать точностью положения плоскости, линии, точки.

Построение эквивалентной схемы рассмотрим на примере технологической сборочной системы для сборки соединения вал-втулка (рис. 1.8.26). Процесс сборки рассматривается как совмещение основных баз присоединяемой детали с вспомогательными базами детали, к которой присоединяют. Здесь имеет место противоречие между требованиями, предъявляемыми к точности собранной сборочной единицы (вал-втулка) и к точности процесса соединения деталей. Оно заключается в том, что для обеспечения точности собранной сборочной единицы необходимо, чтобы вспомогательные базы вала (система Σ_4) (рис. 1.8.27) заняли требуемое положение относительно основных баз втулки (система Σ_1), а для обеспечения точности процесса соединения – совмещение основных баз (система Σ_3) присоединяемого вала со вспомогательными базами (система Σ_2) втулки, к которой присоединяют. Детали всегда

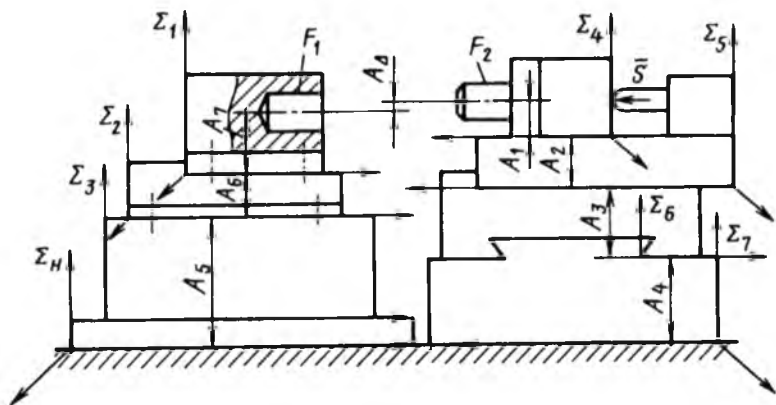


Рис. 1.8.26. Координатные системы сборочной машины для соединения вала с втулкой

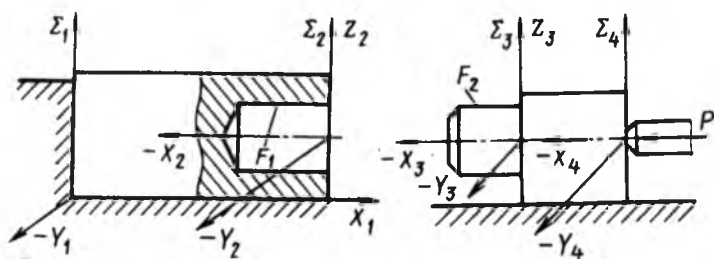


Рис. 1.8.27. Схема соединения вала со втулкой

погрешности положения Σ_2 относительно Σ_1 и Σ_4 относительно Σ_3 , поэтому при сборке совмещением Σ_4 с Σ_2 указанная погрешность будет суммироваться.

Чтобы построить эквивалентную схему, установим размерную цепь, замыкающим звеном которой является размер A_Δ (см. рис. 1.8.26), определяющий несовпадение оси отверстия с осью вала. На основных базах деталей, размеры которых вошли в размерную цепь A технологической сборочной системы, построим координатные системы $\Sigma_1, \dots, \Sigma_7$ в неподвижной системе Σ_n . Выявив схемы базирования каждой из ее деталей, наложим на них известным способом связи. В итоге получим эквивалентную схему из координатных систем, векторные связи которой показаны на рис. 1.8.28.

Вывод уравнения относительного движения вала и втулки. Процесс сборки осуществляется при поступательном движении вала. Сборку подвижного соединения проводят при условии, что

$$D_o > d_n \text{ и } d_o - d_n \leq \Delta,$$

где d_o – диаметр отверстия во втулке; d_n – наружный диаметр вала; Δ – зазор в соответствии с заданной посадкой.

Статическая настройка технологической сборочной системы включает установку собираемых деталей и настройку размерных и кинематических цепей на заданный закон относительного движения собираемых деталей без рабочих нагрузок. В данном случае точность поступательного движения обеспечивается в результате точности изготовления направляющих.

Динамическая настройка включает рабочий процесс с учетом всех факторов, действующих в это время.

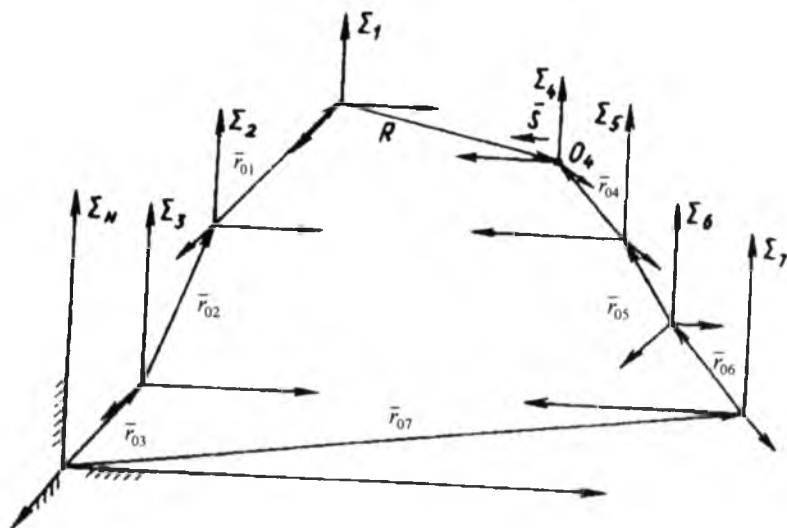


Рис. 1.8.28. Векторные связи эквивалентной схемы сборочной машины

При построении модели *статической* настройки собираемые детали отсутствуют и тогда уравнение движения записывается как относительное движение координатных систем, построенных на вспомогательных базах, по которым базируются собираемые детали. При построении модели *динамической* настройки записывается уравнение относительного движения сопрягаемых поверхностей.

В этом случае каждая из двух поверхностей F_1 и F_2 соединяемых деталей ориентирована относительно координатной системы, построенной на основных базах ее детали (см. рис. 1.8.26). Принимая одну из этих координатных систем неподвижной, например Σ_1 , записываем в ней движение координатной системы Σ_4 другой детали. Записав положения поверхностей F_1 и F_2 в координатной системе Σ_1 , можно определить относительное положение этих поверхностей в результате осуществления сборочного перехода.

Согласно эквивалентной схеме (см. рис. 1.8.28) положение координатной системы Σ_4 относительно Σ_1 определяется радиусом-вектором $\bar{R}$ и матрицей M трех поворотов, тогда движение системы Σ_4 относительно системы Σ_1 можно записать системой уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{R} &= \prod_{i=1}^3 M_i^{-1} \left[\left(\prod_{i=5}^7 M_i \bar{r}_{04} + \prod_{i=6}^7 M_i \bar{r}_{05} + M_7 \bar{r}_{07} + \bar{S} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \left(\prod_{i=2}^3 M_i \bar{r}_{01} + M_2 \bar{r}_{02} + \bar{r}_{03} \right) \right]; \\ M &= \prod_{i=1}^3 M_i^{-1} \prod_{i=4}^7 M_i, \end{aligned} \right. \quad (1.8.24)$$

где $M_i = M_1, M_2, \dots, M_7$ – матрицы поворотов соответственно системы $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_7$; M_i^{-1} – обратная матрица; $\bar{r}_{01}, \bar{r}_{02}, \dots, \bar{r}_{07}$ – радиус-векторы систем $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_7$ соответственно; $\bar{S}$ – вектор поступательного движения системы Σ_4 .

Ввод факторов в уравнение (1.8.24) осуществляется так же, как и при построении математической модели процесса обработки деталей.

1.8.6. ПОСТРОЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Известно, что технологический процесс, функционирование технологической системы подвержены воздействию многочисленных случайных факторов. В этом случае на помощь исследователю приходят приемы и способы моделирования, основанные на методах теории вероятностей и математической статистики. Теория вероятностей изучает случайные события, случайные величины и их распределение. Математическая статистика дает информацию, получаемую при конкретных реализациях случайных событий и величин. Если какой-либо процесс описывается тем или иным законом распределения, то математическую запись этого закона распределения уже можно рассматривать как математическую модель данного процесса.

С помощью вероятностно-статистических моделей решаются различного рода задачи проектирования, изготовления и контроля изделий, в частности, при расчетах и исследованиях точности процессов и оборудования, суммарных погрешностей изготовления изделий, размерных цепей, а также разработке и выборе статистических методов контроля качества изделий.

В технологии машиностроения наиболее часто встречаются вероятностно-статистические модели, описываемые следующими законами рас-

пределения: закон Бернулли (биномиальное распределение), закон нормального распределения (закон Гаусса), закон Пуассона, закон равной вероятности, закон Симпсона и многие другие и их комбинации.

Распределением Бернулли описываются процессы, которые предполагают условие независимости испытаний при неизменной вероятности $p = \text{const}$ появления события при каждом эксперименте или при вероятности $q = 1 - p$ того, что событие не состоится.

Тогда вероятность осуществления m успехов в серии из n экспериментов

$$P_n(m) = C_n^m p^m (1 - p)^{n-m},$$

где $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$ — число сочетаний из n элементов по m .

Это распределение служит математической моделью многих процессов, в частности, может описывать ситуацию обработки партии одинаковых деталей на одном станке.

Закон нормального распределения служит моделью процессов, результат которых зависит от большого числа независимых факторов примерно одного порядка. Такому распределению часто подчиняются процессы измерения при автоматическом или близком к нему изготовлении деталей на станках и др.

Функция распределения случайной величины X , подчиняющейся нормальному закону:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2/2\sigma^2} dx.$$

Математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратичное отклонение описываются так:

$$M\{X\} = a, \quad D\{X\} = \sigma^2; \quad \sigma[X] = \sigma.$$

Распределение Пуассона описывает процессы, которые относятся к так называемым редким событиям. Функция распределения случайной величины, подчиняющаяся закону Пуассона, имеет вид

$$F(x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}.$$

Это распределение широко используют в теории надежности, в задачах, связанных с обслуживанием заявок, поступающих в систему.

Из других законов распределения следует упомянуть распределение по закону равной вероятности. Он моделирует поведение случайных величин, появляющихся при ошибках округления по шкале до ближайшего целого деления, в ошибках электрических синхронных передач ступенчатого типа, в направлении векторных ошибок в механизмах, например, ошибок от эксцентриситетов, перекосов осей и т.д.

Область возможных значений случайной величины, подчиненной закону равной вероятности, определяется от b до c .

Плотность вероятности

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0, & x < b; \\ \frac{1}{c-b}, & b \leq x \leq c; \\ 0, & x > c. \end{cases}$$

Математическое ожидание, дисперсия и ее среднеквадратическое отклонение:

$$M\{x\} = \frac{b+c}{2}; \quad D\{x\} = \frac{(c-b)^2}{12}; \quad \sigma\{x\} = \frac{c-b}{2\sqrt{3}}.$$

Приведенные выше модели являются простейшими вероятностными моделями распределения одной величины.

Более сложная задача — описание зависимости между двумя величинами x и y . Попробуем построить график зависимости y от x , исследователь поступает следующим образом: задавая значение входа x , он измеряет значение выхода y . Если бы случайные факторы отсутствовали, то выход y получался бы однозначно. Но на самом деле при одном и том же значении x исследователь получит целый ряд выходных значений y (рис. 1.8.29, а). Становится очевидным, что между X и Y связь можно определить, лишь обратившись к методам теории вероятностей и математической статистики.

Теоретически просто найти кривую $y = f(x)$, если x, y заданы совместным распределением вероятностей. Тогда в качестве кривой берется условное математическое ожидание случайной величины y при условии, что величина x приняла определенное значение:

$$M(y|x = x_0) = \varphi(x).$$

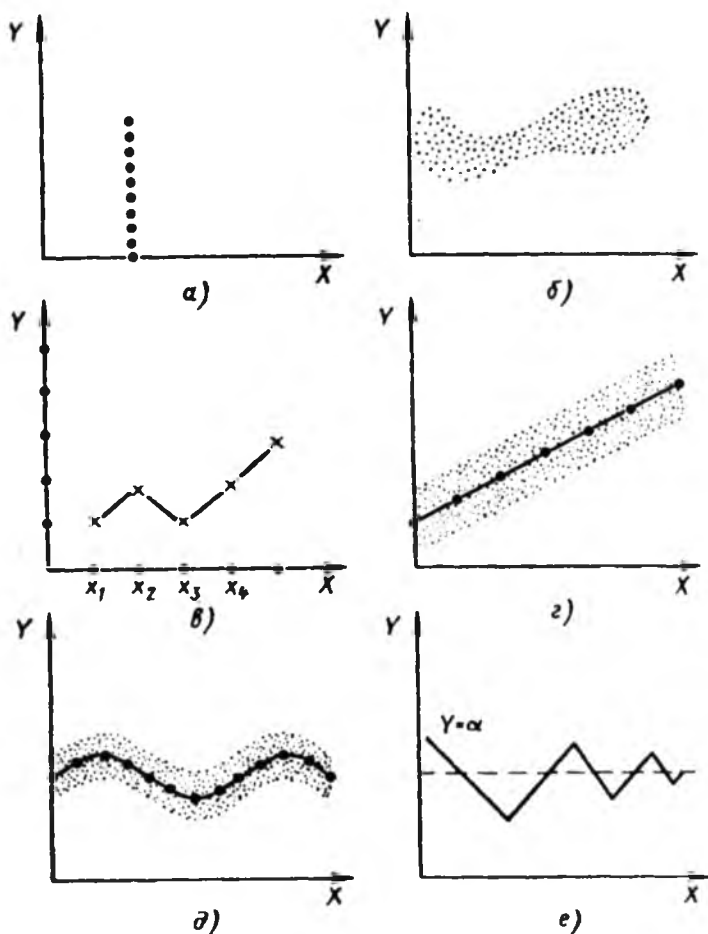


Рис. 1.8.29. Точечные диаграммы

Эта функция и будет искомой зависимостью в среднем между y и x . Уравнение $y = f(x)$ называется уравнением регрессии y на x .

На практике точный вид распределения почти всегда неизвестен, поэтому вид уравнения $y = y(x)$ также неизвестен. В распоряжении исследователя есть лишь некоторый набор наблюдений – "облако" данных (рис. 1.8.29, б). В этом случае поступают так: сначала для различных

входных значений x строят соответствующие точки y , затем при каждом значении x , т.е. по каждой вертикали, усредняют имеющиеся значения y (рис. 1.8.29, в). Эти средние значения и будут аналогом условного математического ожидания выхода по входу; они дают возможность построить приближенно график зависимости Y от X . Затем полученную кривую можно аппроксимировать (приблизить) какой-либо известной функцией, которая и будет математической моделью неизвестного уравнения регрессии.

Примером таких математических моделей может служить точечная диаграмма размера обработанных деталей. Так, действие случайных факторов и систематического износа режущего инструмента описывается линейной моделью: $y = ax + b$ (рис. 1.8.29, г). Действие нескольких случайных и систематических факторов (рис. 1.8.29, д) можно описать моделью, представляющей собой тригонометрическую функцию

$$y = A \sin K_1 x + B \cos K_2 x + C.$$

Уравнение регрессии $y = f(x)$ неизвестно и из экспериментального материала его нельзя вывести аналитически. Поэтому исследователь поступает следующим образом: по внешнему виду "облака" данных он подбирает математическую модель – какую-либо аналитическую зависимость y от x , обычно в виде такой зависимости применяется многочлен

$$p_n(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n.$$

В математическом анализе имеется теорема, утверждающая, что любую непрерывную функцию $y = \varphi(x)$ с любой заданной точностью T можно описать многочленом $p_n(x)$ определенной степени.

Коэффициенты многочлена выбирают таким образом, чтобы его график как можно ближе, теснее прилегал к экспериментальным точкам. В качестве меры отклонения графика от имеющихся значений обычно берут сумму квадратов отклонений в соответствующих точках x .

Если исследуемая величина y зависит более чем от одного фактора, т.е. $y = f(x_1, \dots, x_n)$ является функцией нескольких переменных (факторов), то в этом случае для построения уравнения регрессии используют методы планирования эксперимента.

К планированию эксперимента обращаются тогда, когда пренебречь зависимостью y от нескольких факторов, кроме одного, невозможно, не исказив картину процесса. К планированию эксперимента прибегают и тогда, когда необходимо получить какую-либо аналитическую зависимость между параметрами процесса, которую нельзя вывести на основе

причинно-следственных связей, так как последние неизвестны. К таким задачам можно отнести задачу определения зависимости силы резания от параметров процесса: глубины резания, твердости материала, геометрии режущего инструмента и т.п.; к этой же задаче можно отнести задачу определения периода стойкости инструмента.

Определение коэффициентов уравнения регрессии иначе можно называть идентификацией объекта как "черного ящика", функционирование которого описывает это уравнение.

Перечисленные способы, однако, становится трудно применять для идентификации сложных технических объектов, когда зависимость y от x существенно нелинейна. В этом случае прибегают к методу Монте-Карло или статистических испытаний.

Схема его применения такова. Пусть функция $y = f(x)$ существенно нелинейна (сложна) и отсутствуют удовлетворительные методы решения этой задачи. Датчик случайных чисел дает возможность построить последовательность случайных чисел $x_1, x_2, \dots, x_N$ с требуемым законом распределения. С помощью исходной формулы (т.е. проведя эксперимент), можно получить последовательность значений

$$y_1 = f(x_1), y_2 = f(x_2), \dots, y_n = f(x_N),$$

представляющую некоторую случайную последовательность. Проведя достаточно большое число вычислений и обработав последовательность $y_1, y_2, \dots, y_N$, можно с любой заданной точностью определить статистические свойства случайной величины Y и найти интересующий закон распределения. Таким образом, выход "черного ящика" моделируется как случайная величина с определенным законом распределения.

Один из возможных способов применения метода Монте-Карло – оптимизация режимов резания при нелинейном критерии оптимизации (например, себестоимость механической обработки изделия). Автоматизация технологических процессов и управления ими ставит новые задачи, некоторые из них можно решить с помощью метода стохастической аппроксимации.

Метод стохастической аппроксимации состоит в следующем. С помощью датчика случайных чисел определяется $\xi = \xi_1$ (моделируется случайное возмущение). Для этого $\xi = \xi_1$ решается неслучайная задача каким-либо методом оптимизации и находится значение управляемого параметра $x = x_1$. Далее по новому случайному значению $\xi = \xi_2$ находят $x = x_2$. Вычисляют

$$\bar{x}_2 = x_1 + \alpha_1(x_2 - x_1).$$

Этим же способом определяют $x = x_3$ и следующее приближение:

$$\tilde{x}_3 = \tilde{x}_2 + \alpha_2(x_3 - \tilde{x}_2) \text{ и т.д.}$$

Схема указанной процедуры в общем виде может быть представлена так:

$$\tilde{x}_k + 1 = \tilde{x}_k + \alpha_k(x_{k+1} - \tilde{x}_k),$$

где α_k – коэффициент; k – номер шага процедуры, которая выполняется при следующих условиях:

$$\alpha_k \rightarrow 0; \quad \sum \alpha_k = \infty; \quad \sum \alpha_k^2 < \infty.$$

Эту процедуру можно изобразить графически (см. рис. 1.8.29, е). Выполняя эту процедуру для каждого заданного значения α , можно моделировать зависимость y от x в среднем.

Метод стохастической аппроксимации универсален. С его помощью можно решать задачи на оптимум. Метод стохастической аппроксимации используют при создании адаптивных систем управления технологическим оборудованием, предназначенных для повышения точности размера.

Особое значение в технологии машиностроения имеет моделирование процессов, параметры и характеристики которых изменяются с течением времени. Сюда можно отнести все процессы механической обработки деталей, временные связи технологических процессов, задачи активного контроля размеров. Эти задачи и другие, им подобные, решаются с привлечением аппарата теории случайных процессов (случайных функций).

Значения случайного процесса $X(t)$ при каждом t являются случайными величинами. Основные характеристики случайного процесса:

– функция $A(t) = Mx(t)$, называемая средним значением случайного процесса;

– корреляционная матрица $B\{B(t_k, t_l)\}$, составленная из значений функции $B(s, t) = M[x(s) - A(s)][x(t) - A(t)]$, называемая корреляционной функцией процесса и служит моделью взаимосвязи значений процесса в различные моменты времени.

Каждое значение $x(t)$ случайного процесса, являясь случайной величиной, формально зависит от некоторого элементарного события (исхода). Рассматривая случайный процесс при каждом элементарном исходе, мы имеем соответствующую функцию, которая называется реализацией или траекторией или выборочной функцией случайного процесса. Реально наблюдая случайный процесс, фактически можно наблюдать одну из его возможных траекторий. Представим, что имеется некоторая совокуп-

ность X всех возможных траекторий и некоторый "механизм случайности" избирает одну из этих функций $x(t)$. Общая теория случайных процессов имеет несколько частных теорий: стационарных случайных процессов, цепей Маркова, диффузионных процессов. Пользуясь методами теории случайных процессов, можно решать задачи прогнозирования и регулирования.

Широко применяют эту теорию в задачах активного контроля размеров. Известно, что погрешности размеров являются результатом совместного действия ряда факторов, носящих случайный характер (изнашивание и затупление режущего инструмента, тепловые и силовые деформации технологической системы), степень влияния которых на процесс механической обработки изменяется в процессе обработки, т.е. с течением времени. При моделировании действия этих факторов использование аппарата случайных процессов (случайных функций) позволяет получить гораздо больший объем интересующей информации, чем использование для этой цели лишь одной реализации случайной величины. Теорию случайных процессов применяют также при создании различного рода систем автоматического регулирования, следящих систем.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем разница между детерминированной и вероятностной математическими моделями?

2. В чем состоит сущность метода координатных систем с деформирующими связями?

3. Понятие эквивалентной схемы технологической системы.

4. В чем разница между погрешностями обработки и детали?

5. Как строится эквивалентная схема?

6. Этапы построения математической модели методом координатных систем с деформирующими связями.

7. В чем разница между математическими моделями погрешностей статической и динамической настройки технологической системы?

8. Относительно каких баз определяются погрешности установки заготовки и инструмента?

9. Когда применяется закон Бернулли (биномиальное распределение)?

10. Когда применяется закон нормального распределения?

11. Когда применяется закон распределения Пуассона?

12. Когда применяется закон распределения Симпсона?

13. Когда применяется закон распределения равной вероятности?

Глава 1.9

РАСЧЕТЫ НА ТОЧНОСТЬ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В основе проектирования технологических процессов, машин, механизмов лежит знание зависимостей между качественными показателями, в том числе и точностью, конструктивными параметрами машины, действующими факторами, условиями эксплуатации. Знание этих зависимостей позволяет оценивать принимаемые решения и выбирать наилучшие. Разнообразие технологических систем, условий, в которых они эксплуатируются, существенно влияют на характер этих зависимостей.

Точностные зависимости устанавливаются в большинстве случаев на основе экспериментальных исследований, отличающихся высокой трудоемкостью, потребностью в сложной оснастке, аппаратуре и высококвалифицированных специалистах. Это приводит к тому, что при проектировании технологических процессов, технологических систем пользуются, главным образом, рекомендациями, зависимостями, отражающими лишь качественную сторону этого вопроса. В результате значительно снижается качество разработок, что влечет за собой многочисленные переделки, требует длительной отладки технологических процессов, испытаний опытных образцов и т.п.

Если учесть возрастающую быстроту смены выпускаемых изделий и связанное с этим повышение частоты смены технологических процессов, станков, оснастки, то становится очевидной необходимость в разработке таких методов исследования механизма образования погрешностей обработки и их расчетов, которые сочетали бы в себе высокую точность и малые затраты времени. Этим требованиям удовлетворяет метод математического моделирования, особенно он эффективен при условии применения ЭВМ.

Применение математического моделирования на ЭВМ не только сокращает время на установление указанных выше зависимостей, но и играет качественно новую роль в научных исследованиях. С его помощью становится возможным изучать влияние отдельно взятого фактора на точность обработки без нарушения общей картины явления. Последнее обычно имеет место при экспериментальном исследовании, когда для установления влияния одного фактора искусственно подавляется влияние других. При моделировании можно не прибегать к упрощениям (необходимым при экспериментальных исследованиях), так как возможности современных ЭВМ практически неограниченны, а это, в свою очередь,

позволяет учитывать большинство факторов, влияющих на точность обработки.

Ниже рассматриваются решения типовых задач точности с помощью математического моделирования на базе моделей, построенных методом координатных систем с деформирующимися связями.

Задачи в расчетах на точность отличаются большим разнообразием и рассмотреть их все не представляется возможным. Поэтому в этой главе рассматривается ряд задач достаточно широко встречающихся на практике, к которым относятся:

- 1) расчет погрешностей обработки;
- 2) выбор варианта схемы базирования заготовки, обеспечивающей наивысшую точность обработки;
- 3) выбор элементов режима обработки, обеспечивающих заданную точность;
- 4) выбор схемы многоинструментной наладки, обеспечивающей наивысшую точность;
- 5) исследование точности обработки.

Перечисленные задачи отличаются многовариантностью и высокой трудоемкостью, поэтому при их решении применение метода математического моделирования с использованием вычислительной техники позволяет в процессе расчетов перебирать большое число вариантов и находить оптимальные решения при незначительных затратах времени.

1.9.1. ВЫБОР РЕЖИМА ОБРАБОТКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ЗАДАННУЮ ТОЧНОСТЬ

При проектировании технологических операций, выбирая режим обработки, важно знать ожидаемую погрешность обработки.

Анализ нормативных материалов по выбору режимов резания показывает отсутствие каких-либо данных, указывающих на связь между режимами резания и точностью обработки. Исключение составляет лишь подача, выбор которой связывают с шероховатостью обработанной поверхности, что явно недостаточно. В итоге выбранные режимы резания не гарантируют получения обработанной детали с заданной точностью, поэтому при выборе режимов приходится их занижать, чтобы гарантировать получение заданной точности, а также затрачивать время на корректировку режимов резания на станке. Все это затрудняет нормирование технологического процесса, не позволяет оптимизировать применяемые решения, препятствует внедрению автоматизации проектирования технологических процессов.

Особенно важен выбор режимов резания для станков с ЧПУ при разработке в большом количестве управляющих программ. В связи с отсутствием возможности рассчитать с требуемой точностью погрешность обработки, вынуждены предусматривать дополнительные проходы, тратить время на отладку управляющей программы. В связи с изложенным очевидна необходимость в установлении и математическом описании связей между режимами и точностью обработки. Ниже излагается методика решения задачи выбора элементов режима обработки, обеспечивающих заданную точность.

Методика заключается в построении математической модели механизма образования погрешностей обработки, назначении по справочно-нормативным данным элементов режима обработки, в получении расчетов ожидаемой погрешности, сравнении ее значения с допуском и в случае выхода за границы допуска внесения коррективов в режим обработки, обеспечивающих положение погрешности в границах поля допуска.

Рассмотрим пример выбора элементов режима фрезерования, обеспечивающих заданную точность при обработке на вертикально-фрезерном станке мод. 6Р12, предназначенном для фрезерования плоскостей, различного рода пазов, канавок и т.п. Для решения этой задачи построим математическую модель механизма образования погрешностей обработки.

На рис. 1.9.1, *а* показан вертикально-фрезерный станок, где замыкающим звеном при фрезеровании является расстояние между режущими кромками фрезы и установочной базой заготовки. На рис. 1.9.1, *в, г* приведены детали, входящие своими размерами в размерную цепь станка, на которых в соответствии со схемой их базирования построены координатные системы.

При условии, что фрезерование осуществляется за счет продольного движения стола, среди деталей, входящих в размерную цепь, шпиндель и продольный стол имеют по одной степени свободы. Шпиндель вращается, а стол совершает поступательно-возвратное движение.

После построения координатных систем на основных базах деталей (для заготовки основные базы совпадают с технологическими) и, исключив детали, получим эквивалентную схему, приведенную на рис. 1.9.1, *б*. В качестве неподвижной системы координат Σ_N , в которой осуществляются все перемещения остальных координатных систем, принята система, построенная на вертикальных направляющих (вспомогательных базах) стойки станка. Пользуясь полученной эквивалентной схемой (см. рис. 1.9.1, *б*), запишем уравнение относительного движения вершины зуба фрезы в системе координат Σ_z , построенной на технологических базах заготовки.

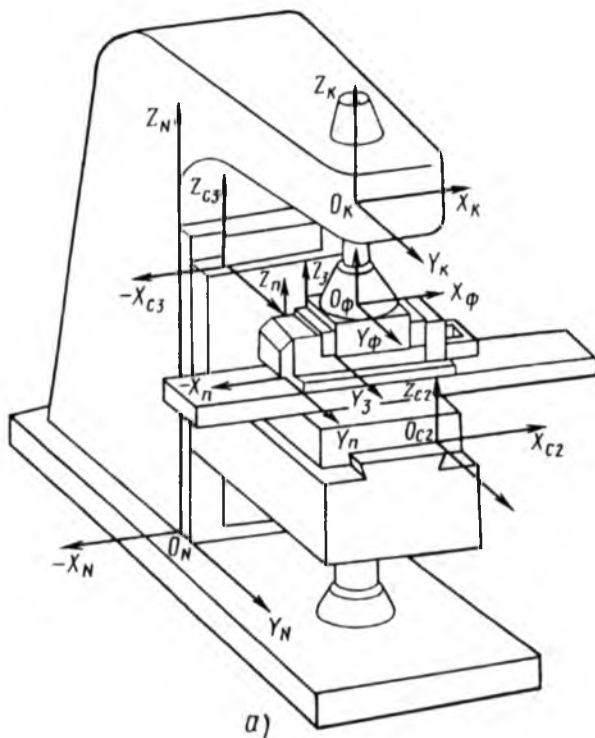


Рис. 1.9.1. Вертикально-фрезерный станок (начало рисунка):

a – общий вид; *б* – эквивалентная схема; *в* – ветвь заготовки; *г* – ветвь фрезы; *л* – опорные точки

Пусть фреза совершает вращательное движение по закону $\omega = \omega(t)$, а стол движется поступательно по закону $s = s(t)$, тогда

$$\begin{aligned} \bar{R}^\Phi = & M_{c3}^{-1} M_{c2}^{-1} M_{c1}^{-1} M_3 [M_\Phi M_0 M_\omega M_\kappa \bar{r}_{3\Phi} - M_0 M_\omega M_\kappa \bar{r}_\Phi + \\ & + M_\omega M_\kappa \bar{r}_0 + M_\omega M_\kappa \bar{r}_\omega - M_{c1} M_{c2} M_{c3} \bar{r}_{c1} + M_{c2} M_{c3} \bar{r}_{c2} - \\ & - M_{c3} \bar{r}_{c3} - M_{c1} M_{c2} M_{c3} \bar{s}_x + \bar{r}_\kappa - \bar{r}_N], \end{aligned}$$

где $\bar{R}^\Phi$ – радиус-вектор, определяющий положение вершины зуба фрезы в координатной системе заготовки; M_{c3}^{-1} , M_{c2}^{-1} , M_{c1}^{-1} – обратные матрицы

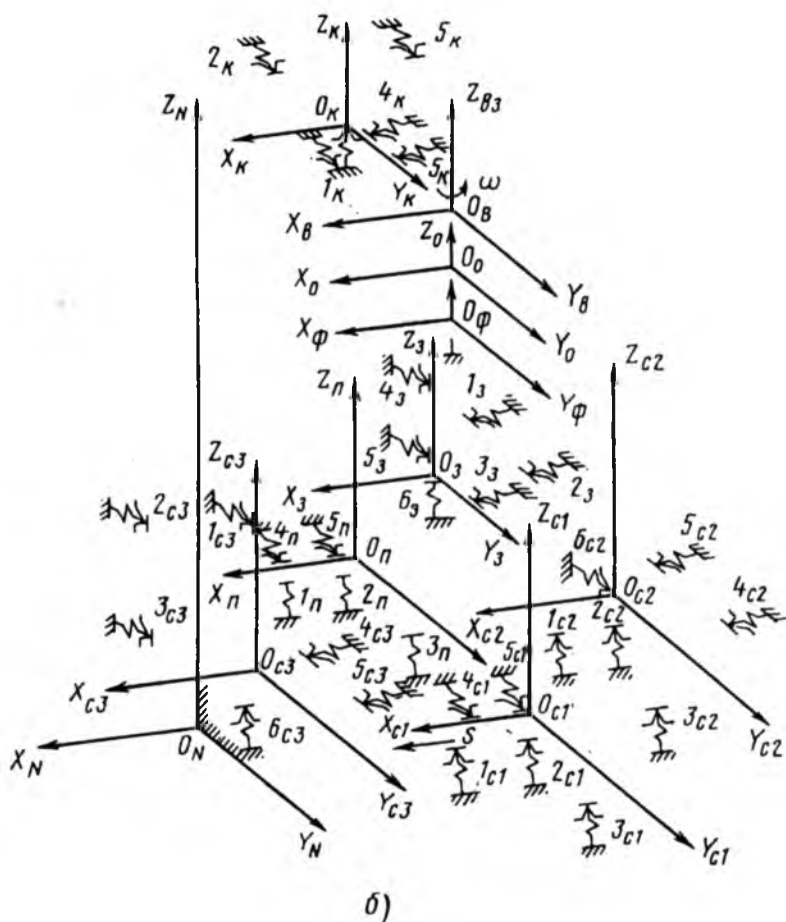


Рис. 1.9.1 (продолжение)

поворотов координатных систем деталей, входящих в ветвь заготовки; M_ω – матрица поворота координатной системы шпинделя по закону $\omega = \omega(t)$; $\bar{S}_x$ – вектор перемещения координатной системы стола продольной подачи по закону $s = s(t)$; $M_\phi, \dots, M_x$ – матрицы поворотов координатных систем деталей ветви инструмента под действием внешних

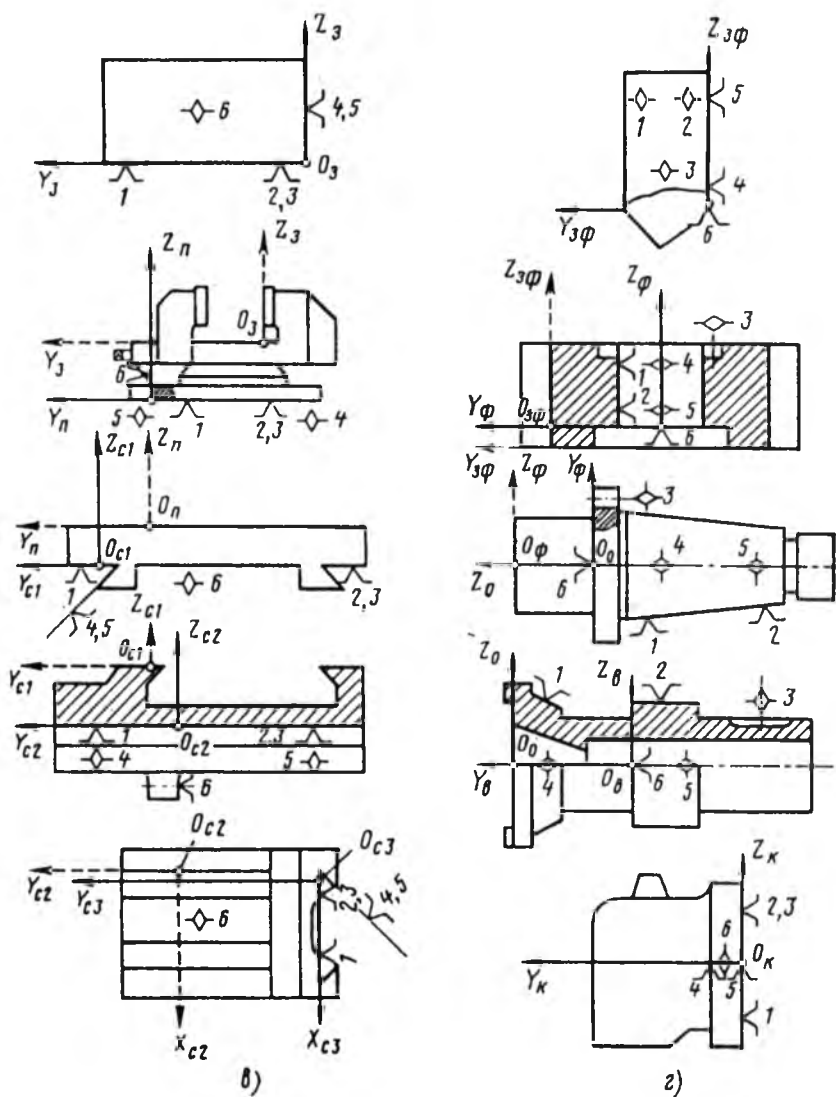


Рис. 1.9.1 (окончание)

факторов; $\vec{r}_{3\phi}, \dots, \vec{r}_k$ – радиус-векторы, соединяющие начала координатных систем деталей ветви инструмента; $M_{c1}, \dots, M_{c3}$ – матрицы поворотов координатных систем деталей ветви заготовки под действием внешних факторов; $\vec{r}_{c1}, \dots, \vec{r}_N$ – радиус-векторы, соединяющие начала координатных систем деталей ветви заготовки.

Введем в уравнение движения факторы, порождающие погрешность обработки. В связи с этим рассмотрим, прежде всего, силы, действующие непосредственно во время фрезерования. К этим силам относятся силы резания, тяжести, инерции, а также крутящий момент, передаваемый на фрезу, и подача, передаваемая столу посредством кинематики станка. Чтобы ввести эти силы и моменты в модель, надо знать, в каких координатных системах они действуют, а также точки их приложения, направления действия и их величины.

Силы резания действуют одновременно на заготовку и фрезу, поэтому рассматривают их действие в координатных системах фрезы Σ_ϕ и заготовки Σ_z .

В процессе фрезерования в зависимости от положения заготовки на столе, конфигурации обрабатываемой поверхности, числа зубьев на фрезе будут изменяться точка приложения, направление и величина равнодействующей сил резания, действующих на зубьях фрезы. Поэтому, чтобы определить перечисленные выше переменные, необходимо установить соответствующие зависимости. В основу этих зависимостей положен угол контакта ϕ_k , определяющий число одновременно работающих зубьев фрезы, однако угол контакта может изменяться из-за переменной ширины фрезерования. Сложность установления зависимости, определяющей число одновременно работающих зубьев, объясняется случайным характером изменения ширины фрезерования от одного типа заготовки к другому.

Ширина фрезерования есть функция конфигурации заготовки, ее установки на столе станка и относительного расположения фрезы и заготовки. Определив положение заготовки в координатной системе стола станка, контур обрабатываемой поверхности разбивают на участки, которые могут быть описаны соответствующими уравнениями.

Следующим шагом является определение координат точек контакта фрезы с линиями контура обрабатываемой поверхности заготовки. Для этого достаточно решить систему уравнений, включающую уравнение данного участка контура обрабатываемой поверхности и уравнение окружности диаметром, равным диаметру фрезы.

Зная угол φ , между зубьями фрезы и угол контакта φ_k фрезы с заготовкой, можно рассчитать число одновременно работающих зубьев из формулы $z_k = \varphi_k / \varphi$. Если это отношение дробное, то число зубьев в работе за один оборот фрезы будет изменяться на единицу. Зная число одновременно работающих зубьев, легко подсчитать величину равнодействующей сил резания, ее направление и координаты точки приложения.

Найдем реакции в каждой опорной точке каждой координатной системы эквивалентной схемы. Пусть на Q -ю координатную систему эквивалентной схемы действуют внешние силы, $\bar{P}_1, \dots, \bar{P}_n$ – система сил резания на каждом зубе фрезы, находящемся в фиксированный момент времени в зоне резания; G – масса детали, на которой построена Q -я координатная система (рис. 1.9.2).

Чтобы найти реакции в опорных точках Q -й координатной системы, определим главный вектор $\bar{R}_Q$ и главный момент системы внешних сил $\bar{W}_Q$ относительно ее начала:

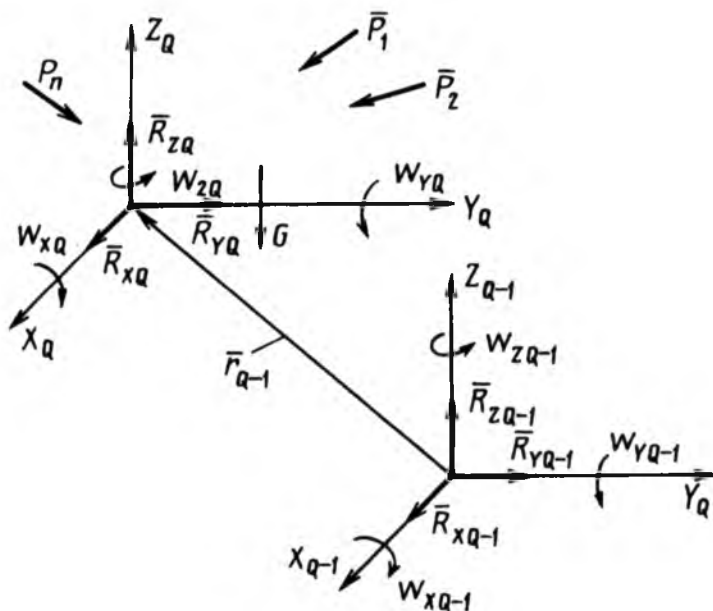


Рис. 1.9.2. Координатная система Σ_Q , находящаяся под воздействием системы сил

$$\overline{R}_Q = R_{xQ} + R_{yQ} + R_{zQ}; \quad \overline{W}_Q = W_{xQ} + W_{yQ} + W_{zQ};$$

$$R_{xQ} = \sum_{j=1}^n P_{xj} + G_{xQ}; \quad W_{xQ} = \sum_{j=1}^n (P_{xj} z_j - P_{zj} x_j) + G_{xQ} z_Q - G_{zQ} x_Q;$$

$$R_{yQ} = \sum_{j=1}^n P_{yj} + G_{yQ}; \quad W_{yQ} = \sum_{j=1}^n (P_{yj} x_j - P_{xj} y_j) + G_{yQ} x_Q - G_{xQ} y_Q;$$

$$R_{zQ} = \sum_{j=1}^n P_{zj} + G_{zQ}; \quad W_{zQ} = \sum_{j=1}^n (P_{zj} y_j - P_{yj} z_j) + G_{zQ} y_Q - G_{yQ} z_Q,$$

где x_j, y_j, z_j – координаты точек приложения внешних сил; P_{xj}, P_{yj}, P_{zj} – проекции внешних сил на координатные оси j -й координатной системы; R_{xQ}, R_{yQ}, R_{zQ} – проекции главного вектора на оси координатной системы; W_{xQ}, W_{yQ}, W_{zQ} – проекции вектора главного момента на оси координатной системы.

Составим систему уравнений равновесия статики:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{xQ} + \sum_{j=1}^6 N_{xQj} = 0; \\ R_{yQ} + \sum_{j=1}^6 N_{yQj} = 0; \\ R_{zQ} + \sum_{j=1}^6 N_{zQj} = 0; \\ W_{xQ} + \sum_{j=1}^6 (N_{xQj} z_{Qj} - N_{zQj} x_{Qj}) = 0; \\ W_{yQ} + \sum_{j=1}^6 (N_{yQj} x_{Qj} - N_{xQj} y_{Qj}) = 0; \\ W_{zQ} + \sum_{j=1}^6 (N_{zQj} y_{Qj} - N_{yQj} z_{Qj}) = 0, \end{array} \right.$$

где $N_{xQj}, N_{yQj}, N_{zQj}$ – реакции j -й опорной точки Q -й координатной системы по направлениям X, Y, Z ; x_{Qj}, y_{Qj}, z_{Qj} – координаты j -й опорной точки Q -й координатной системы.

Решение системы уравнений относительно реакций N_{xi} , N_{yi} , N_{zi} позволит определить искомые реакции в опорных точках Q -й координатной системы.

Для того чтобы перейти к расчету реакций в следующей координатной системе Σ_{Q-1} , необходимо: предварительно определить перемещения опорных точек, положение Q -й координатной системы относительно $(Q-1)$ -й координатной системы, сформировать матрицу N_Q поворота Q -й координатной системы; определить главный момент $\bar{W}_{Q-1}$ и главный вектор $\bar{R}_{Q-1}$ внешних сил относительно начала $(Q-1)$ -й координатной системы по формулам:

$$\bar{R}_{Q-1} = M_Q \bar{R}_Q; \quad \bar{W}_{Q-1} = W_{x(Q-1)} + W_{y(Q-1)} + W_{z(Q-1)};$$

$$W_{x(Q-1)} = M_Q W_{xQ} + M_Q (R_{xQ} z_{Q-1} - R_{zQ} x_{Q-1});$$

$$W_{y(Q-1)} = M_Q W_{yQ} + M_Q (R_{yQ} x_{Q-1} - R_{xQ} y_{Q-1});$$

$$W_{z(Q-1)} = M_Q W_{zQ} + M_Q (R_{zQ} y_{Q-1} - R_{yQ} z_{Q-1}),$$

где M_Q – матрица поворота Q -й координатной системы под действием внешних сил; x_{Q-1} , y_{Q-1} , z_{Q-1} – координата начала Q -й координатной системы в координатной системе $Q-1$ с учетом перемещений начала Q -й координатной системы под действием внешних сил и моментов.

Расчет реакций для $(Q-1)$ -й координатной системы проводится аналогичным образом, как и для Q -й координатной системы по уравнению равновесия статики: в котором значения R_{xQ} , R_{yQ} , R_{zQ} , W_{xQ} , W_{yQ} , W_{zQ} заменяются значениями $R_{x(Q-1)}$, ..., $R_{z(Q-1)}$; $W_{x(Q-1)}$, ..., $W_{z(Q-1)}$. Зная реакции и жесткости в опорных точках, можно рассчитать упругие перемещения последних; жесткости в опорных точках определяются экспериментально.

Чтобы ввести в модель изнашивание и геометрические погрешности направляющих стола и шпинделя, устанавливают зависимость между износом и отклонением геометрии направляющих, а затем между отклонениями геометрии направляющих и перемещениями опорных точек в соответствии с методикой, приведенной в п. 1.8.3.

Ниже приводится пример расчета погрешности фрезерования с помощью полученной модели.

Исходные данные сведем к четырем группам.

- 1. Данные, определяющие условия обработки: глубина резания, минутная подача, частота вращения шпинделя, диаметр фрезы, число зубьев фрезы, геометрия заточки, стойкость фрезы, материал заготовки,

материал режущего инструмента, твердость материала заготовки, ширина фрезерования B по сечениям заготовки и расстояния L_i до сечений от торца заготовки со стороны входа фрезы в зону резания (рис. 1.9.3).

- 2. Данные, характеризующие технологическую систему: жесткость в опорных точках, координаты опорных точек элементов технологической системы, координаты начал координатных систем этих элементов и количество элементов.

- 3. Система ограничений, налагаемых на технологическую систему: допустимые значения составляющих сил резания; мощность; скорость по стойкости режущего инструмента; значение подачи, ограниченной требованиями шероховатости поверхности.

- 4. Точностные и размерные параметры заготовки: допуск на обработку, заданный размер детали.

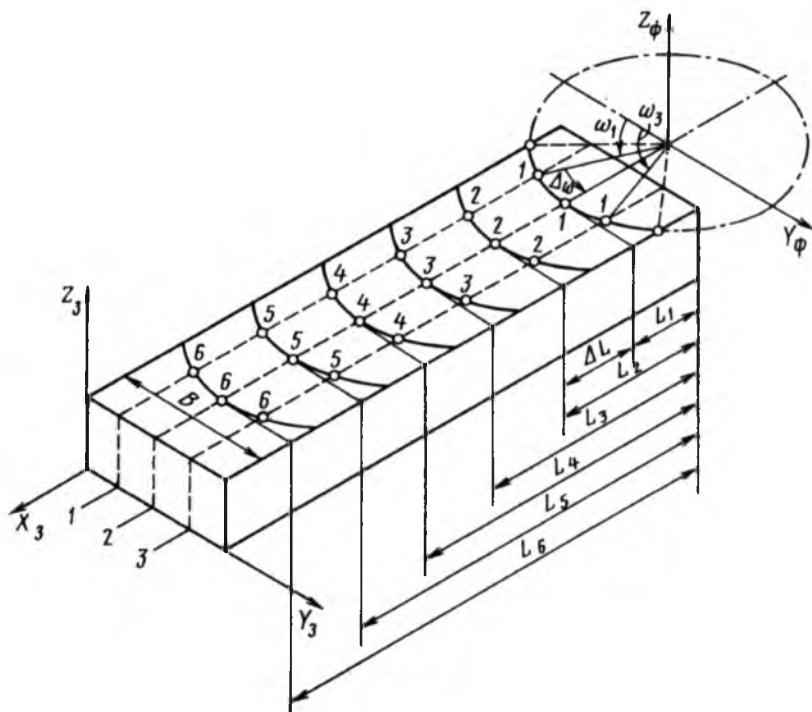


Рис. 1.9.3. Заготовка, обрабатываемая на фрезерном станке

Пусть на станке обрабатывается заготовка призматической формы (см. рис. 1.9.3). Расчет погрешности фрезерования проводился в соответствии с алгоритмом, показанным на рис. 1.9.4. Погрешности рассчитывались в 18 точках, расположенных в трех продольных и шести поперечных сечениях.

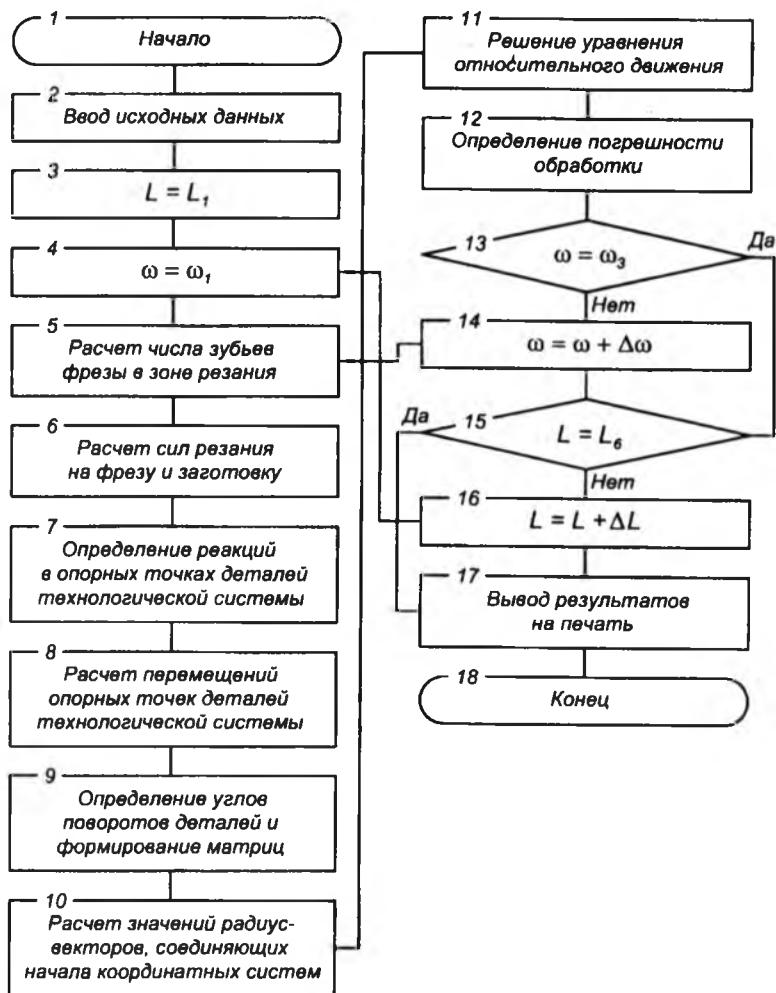


Рис. 1.9.4. Алгоритм расчета погрешности фрезерования

После ввода исходных данных (блок 2) переменной L присваивается значение L_1 (блок 3), т.е. заготовка выводится в заданное сечение. Затем фреза поворачивается на угол ω_1 таким образом, чтобы зуб фрезы совместился с первой точкой первого сечения заготовки, и переменной ω присваивается значение ω_1 (блок 4). Определяется число зубьев фрезы, находящихся в зоне резания (блок 5). Это позволяет рассчитать силы резания, действующие на фрезу и заготовку (блок 6) и приступить к расчету перемещений и поворотов координатных систем эквивалентной схемы.

Расчеты ведутся в следующем порядке: определяются реакции в опорных точках деталей технологической системы (блок 7); рассчитываются перемещения опорных точек деталей технологической системы (блок 8); определяются углы поворотов координатных систем и формируются матрицы поворотов (блок 9); определяются значения радиус-векторов, соединяющих начала координатных систем (блок 10); по уравнению относительного движения рассчитывается значение радиус-вектора, определяющего положение вершины зуба фрезы в заданной точке обработанной поверхности (блок 11) при наличии упругих перемещений; определяются погрешности обработки в заданной точке (блок 12) как разница между заданным значением радиус-вектора и расчетным значением.

Если переменная $\omega = \omega_3$ (блок 13), т.е. определена погрешность в заданных точках сечения, то переходят к следующему сечению заготовки (блок 15). Если переменная $\omega \neq \omega_3$ (блок 13), то фреза поворачивается на угол $\Delta\omega$, переменной ω присваивается значение $\omega + \Delta\omega$ (блок 14) и расчеты повторяются с блока 5.

Если условие блока 15 выполняется, т.е. рассмотрены все сечения заготовки, расчеты заканчиваются выводом на печать погрешности обработки в заданных точках заготовки. Если условие блока 15 не выполняется, заготовка перемещается на величину ΔL ($\Delta L = L_i - L_{i-1}$) и переменной L присваивается значение $(L_i - L_{i-1})$ и расчеты повторяются с блока 4. В табл. 1.9.1 показаны варьируемые параметры.

На основании приведенного алгоритма была разработана программа для расчетов на ЭВМ. По результатам расчета во всех точках всех сечений погрешность обработки колебалась от 0,015 мм до 0,214 мм. Максимальное расхождение измеренной погрешности обработки с расчетным значением получилось в точке 1 (см. рис. 1.9.3) первого сечения и составило 0,02 мм при погрешности обработки 0,214 мм, а расчетной – 0,194 мм. С помощью данной программы определяются значения элементов режима фрезерования, обеспечивающие заданную точность обработки.

Таблица 1.9.1

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	l , мм	S_F (мм/зуб)	B/D	B , мм	D , мм	n , (об/мин)	φ , °	z , шт.	S_m , мм/мин
1	-1	-1	-1	0,5	0,05	0,15	24	160	800	60	10	400
2	1	-1	-1	3,5	0,05	0,15	24	160	800	60	10	400
3	-1	1	-1	0,5	0,126	0,15	24	160	500	60	10	630
4	1	1	-1	3,5	0,126	0,15	24	160	500	60	10	630
5	-1	-1	1	0,5	0,05	0,60	96	160	800	60	10	400
6	1	-1	1	3,5	0,05	0,60	96	160	800	60	10	400
7	-1	1	1	0,5	0,126	0,60	96	160	500	60	10	630
8	1	1	1	3,5	0,126	0,60	96	160	500	60	10	630

Примечание. B – ширина фрезерования; D – диаметр фрезы; l – длина фрезерования; n – частота вращения шпинделя; z – число зубьев фрезы; φ – главный угол в плане.

Определив по справочникам рекомендуемые для заданных условий обработки элементы режима фрезерования, рассчитывается погрешность фрезерования $\Delta \bar{R} = \bar{R}_\phi - \bar{R}$ в каждой точке полученной поверхности. Если окажется, что $\Delta \bar{R} \geq T$, где T – допуск на отклонение $\bar{R}$, то необходимо внести коррективы в значения одного из элементов режима фрезерования (как правило, в продольную подачу).

С этой целью расчеты погрешности повторяют с меньшим значением величины S_m , и ее величина уменьшается до тех пор, пока не будет достигнуто равенство $\Delta \bar{R} = T$.

Более сложно решается задача назначения режимов при многоинструментной обработке. Например, на практике выбор режимов резания для многорезцовкой обработки производится следующим образом.

По составу и числу инструментов, требованиям к точности обработки, по виду обработки назначаются ориентировочные значения подач суппортов (см. рис. 1.9.5). Затем находят экономичные стойкости инструментов при их изолированной работе. Найденные по экономичным стойкости и подаче экономичные скорости резания корректируются с

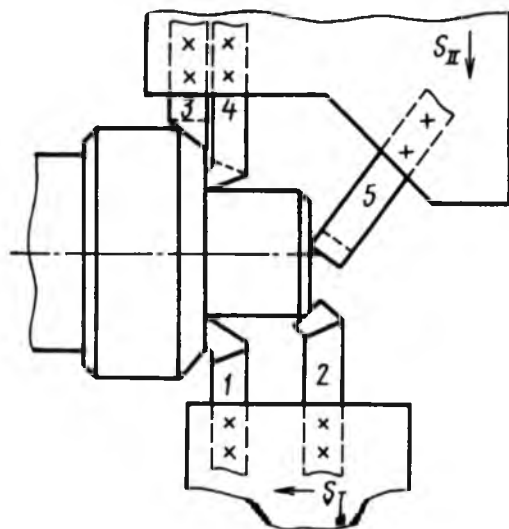


Рис. 1.9.5. Схема многорезцовой наладки

учетом кинематической связанности подач и скоростей резания на отдельных инструментах. Такая методика имеет следующие недостатки: нет гарантии получения заданной точности обработки; не учитывается взаимное влияние факторов, действующих на разных резцах, на погрешности обработки каждой поверхности.

Отмеченные недостатки методики присущи не только для одношпиндельных многорезцовых токарных станков, но и для других станков многоинструментной обработки.

По данным многочисленных исследований, доминирующим фактором в образовании погрешностей при многорезцовой обработке являются упругие перемещения, что объясняется обработкой заготовки одновременно несколькими резцами и недостаточной жесткостью станка.

Изменение условий обработки на одном из резцов влечет за собой в общем случае не только количественное, но и качественное изменение характера процесса образования погрешности на поверхностях, обрабатываемых другими резцами. Эта взаимосвязь обусловлена сложным характером упругих перемещений общих звеньев технологической системы под действием постоянно изменяющихся сил резания и их моментов, действующих на разных резцах в течение обработки. Поэтому влияние на

точность обработки изменения режимов резания на отдельных инструментах необходимо рассматривать как функцию от комплекса условий обработки на других инструментах.

Для решения такой задачи тоже методом координатных систем с деформирующими связями строится математическая модель механизма образования погрешностей многоинструментной обработки, посредством которой с помощью ЭВМ устанавливаются зависимости между погрешностями обработки от каждого обрабатывающего инструмента и режимами обработки. С помощью этих зависимостей можно определить режимы, обеспечивающие заданную точность.

1.9.2. ВЫБОР ВАРИАНТА СХЕМЫ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ

На погрешность обработки большое влияние оказывает схема базирования как заготовки, так и других деталей, которые включаются своими размерами в размерную цепь, где замыкающим звеном является относительное положение технологических баз и режущих кромок инструмента. Схема базирования характеризуется как составом баз, так и расположением опорных точек на базах.

При проектировании технологических операций технолог должен выбрать такую схему базирования заготовки, которая бы обеспечивала заданную точность обработки при наивысшей производительности. Конструктор тоже при проектировании технологической системы должен решать задачу выбора схемы базирования каждой ее детали. К сожалению, в силу сложившейся практики конструктор не продумывает схемы базирования каждой детали и тем более не задает расположение опорных точек на базах, что проявляется, прежде всего, в игнорировании материализации опорных точек.

Например, если при базировании детали установочной плоскостью на ответной поверхности другой детали не формируются опорные точки в виде опорных площадок (пятен) (рис. 1.9.6, а), то в итоге возникает неопределенность базирования, когда неизвестно фактическое расположение пятен контакта.

В то же время в обеспечении определенности базирования и правильного расположения пятен контакта скрыт большой резерв повышения качества технологической системы, ее точности и виброустойчивости.

Неопределенность базирования можно проиллюстрировать на следующем примере. При установке одной детали на другую на сопряженных плоскостях, выступающих в роли установочных баз, из-за погрешностей

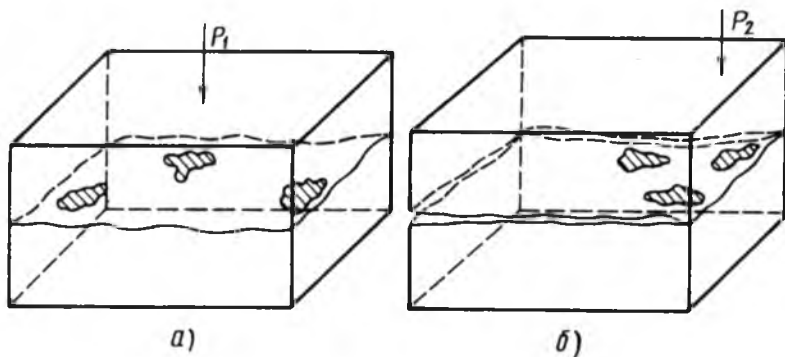


Рис. 1.9.6. Расположение пятен контакта по сопряженным поверхностям при различном приложении сил:
а – под действием силы P_1 ; *б* – под действием силы P_2

их геометрической формы возникнут три пятна контакта, расположенные произвольным образом. Так же случайно будут располагаться пятна контакта и при базировании других деталей. Таким образом, где будут фактически расположены пятна контакта деталей, конструктор не знает. Расположение пятен контакта непостоянно. Стоит только изменить точку приложения силы или ее направление, как в стыке поверхностей возникнет новое расположение пятен контакта (рис. 1.9.6, б).

Одним из радикальных решений проблемы обеспечения определенности базирования каждой детали является обеспечение на этапе конструирования машины постоянного расположения пятен контакта деталей в местах их сопряжения. Исследования показывают, что при сопряжении деталей по плоскостям, фактическая площадь их контакта из-за погрешностей формы составляет около 10 % даже при высоких нагрузках, и это для поверхностей, обработанных шабрением. Базирование деталей по пятнам обеспечит такую же площадь контакта и поэтому удельное давление не возрастет.

Влияние изменения расположения пятен контакта на точность обработки проявляется через изменение упругих перемещений в местах контакта. Если при одной и той же схеме сил, действующих во время обработки, изменить расположение опорных точек, то это приведет к изменению реакций в них и вызовет изменение упругих перемещений, опорных точек. Поэтому при выборе схемы базирования следует решать задачу определения наилучшего расположения опорных точек.

Если обратиться к схеме базирования детали или заготовки, то любая схема базирования представляет собой схему соответствующего расположения опорных точек на трех координатных плоскостях. При этом в пределах одной плоскости расположение опорных точек может варьироваться в определенных пределах.

Рассмотрим в качестве примера влияние различных схем базирования заготовки и вариантов расположения опорных точек на точность обработки на вертикально-фрезерном станке мод. 6Р12.

Расчет погрешностей фрезерования проводился в соответствии с алгоритмом (см. рис. 1.9.4) для заготовки, показанной на рис. 1.9.3. Исходные данные для расчета следующие:

Минутная подача S_m , мм/мин	315
Частота вращения шпинделя n , мин ⁻¹	500
Глубина резания t , мм	3,6
Диаметр фрезы D , мм	160
Число зубьев фрезы z	10
Главный угол в плане φ , °	60
Ширина фрезерования B , мм	140
Длина заготовки L , мм	140
Заданный размер заготовки A_z , мм	140
Расстояния от торца заготовки со стороны фрезы до заданных сечений L_i , мм	20, 40, 60, 80, 100, 120
Диапазон изменения жесткости в опорных точках элементов технологической системы, кН/мм	21,00 ... 90,57
Материал заготовки	Сталь 45
Материал режущей части зубьев фрезы	T15K6

Сопоставляемые схемы базирования заготовки и расположения опорных точек при одной схеме базирования (точки 1, 2, 3 на установочной базе и точки 4, 5 на направляющей базе) приведены в табл. 1.9.2.

Как показали результаты сопоставляемых разных схем базирования, колебания погрешности обработки значительны. Как показали расчеты, в точке 1 сечения 1 (см. рис. 1.9.3) эта разница составила 0,299 мм, а в точке 4 сечения 1 – 0,333 мм; колебание погрешности в одном сечении в зависимости от сечения составляло от 0,001 мм до 0,036 мм. Таким образом,

Таблица 1.9.2

Схема базирования заготовки

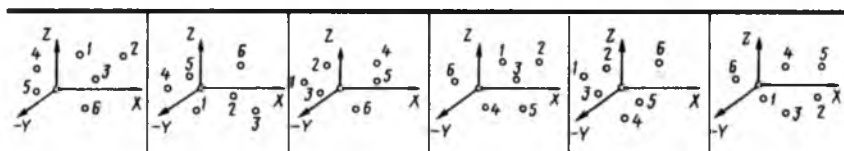
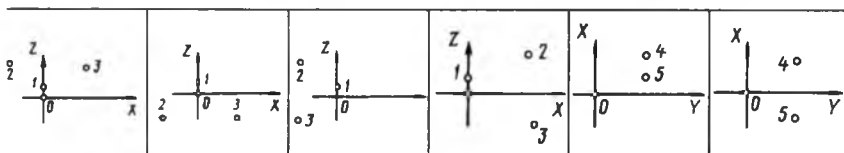


Схема расположения опорных точек



разброс погрешностей обработки в зависимости от изменения схемы базирования может быть соизмерим с допусками на изготовление деталей.

Сопоставление различных схем расположения опорных точек при одном и том же варианте схемы базирования тоже существенно влияет на величины погрешности. В частности, были рассчитаны погрешности фрезерования для *четырех случаев расположения трех опорных точек на установочной базе и для двух случаев расположения двух опорных точек на направляющей базе*. Расчеты погрешностей фрезерования велись для той же заготовки, тех же исходных данных и по тому же алгоритму, что и при сопоставлении вариантов схем базирования.

Сопоставление погрешностей обработки, например, в точке 1 сечения 1 (см. рис. 1.9.3) для *четырех вариантов расположения опорных точек на установочной базе* показало, что разница в погрешностях составила 0,028 мм, в точке 4 сечения 1 – 0,018 мм, в точке 6 сечения 1 – 0,028 мм.

Для *двух вариантов расположения опорных точек на направляющей базе* в точке 1 сечения 1 колебание погрешности обработки составило 0,061 мм, в точке 4 первого сечения 1 – 0,099 мм и в точке 6 сечения 1 – 0,125 мм.

Из изложенного следует, что при проектировании технологических операций следует выбирать схему базирования путем сопоставления нескольких вариантов по значению ожидаемой погрешности обработки, а при проектировании приспособления – выбрать наилучший вариант расположения опорных точек.

Например, при обработке на станках деталей типа вал наиболее часто заготовки базируются по одному из трех вариантов: базирование в трехкулачковом патроне; в трехкулачковом патроне и заднем центре; в центрах с односторонним поводком.

Чтобы при прочих равных условиях правильно выбрать вариант схемы базирования, надо рассчитать для каждого варианта ожидаемую погрешность обработки при заданных режимах обработки и выбрать наилучший вариант.

1.9.3. ВЫБОР ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ В МНОГОИНСТРУМЕНТНОЙ НАЛАДКЕ

Параллельная и параллельно-последовательная обработка многими инструментами находят широкое применение на многошпиндельных фрезерных, сверлильных, расточных станках, на многорезцовых токарных станках, на агрегатных и специальных станках.

Многоинструментная обработка отличается высокой производительностью. Однако практика изготовления деталей на многоинструментных станках показывает, что точность обработки на них, как правило, значительно ниже, чем на одноинструментных. Это объясняется наличием большой силовой нагрузки, большим числом факторов, действующих в процессе обработки, недостаточной жесткостью станков, сложностью настройки их на заданную точность и др. В итоге заданная точность достигается, как правило, за счет увеличения числа проходов, снижения режимов резания, что приводит к потерям производительности.

Различие требований к точности обработки разных поверхностей одной детали, многообразие многоинструментных наладок, изменяющиеся условия обработки даже на протяжении одного прохода – все это чрезвычайно усложняет механизм образования погрешностей обработки и поиск путей повышения точности обработки.

На сегодня практически отсутствуют какие-либо аналитические методы, позволяющие с требуемой точностью рассчитывать погрешности многоинструментной обработки деталей. Изучение механизма образования многоинструментной обработки осуществляется, как правило, экспериментальными методами, отличающимися высокой трудоемкостью и сложностью.

В связи с этим математическое описание механизма образования погрешностей многоинструментной обработки с высокой достоверностью приобретает особую актуальность, так как открываются широкие воз-

возможности по поиску новых путей повышения точности обработки, правильному выбору режимов резания, проектированию наладок без трудоемких экспериментальных исследований. Решение этих задач возможно, если воспользоваться при построении математической модели методом координатных систем с деформирующимися связями.

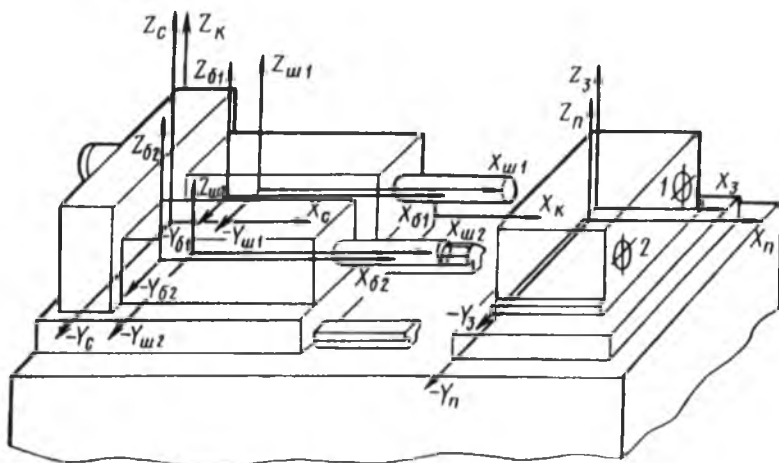
Главной особенностью механизма образования погрешностей многоинструментной обработки деталей является наличие взаимного влияния факторов, порождаемых процессами обработки, осуществляемыми каждым инструментом. Если, например, деталь обрабатывают на двухшпиндельном расточном станке, то силовые факторы, порождаемые процессом обработки инструмента на первом шпинделе, будут оказывать влияние на точность обработки детали инструмента на втором шпинделе. В свою очередь силовые факторы, действующие при обработке инструмента на втором шпинделе, окажут воздействие на точность обработки детали инструмента на первом шпинделе.

Качественное и количественное различие этого взаимного влияния при различных требованиях к точности обрабатываемых поверхностей детали и различных условиях обработки делает картину образования погрешностей весьма запутанной.

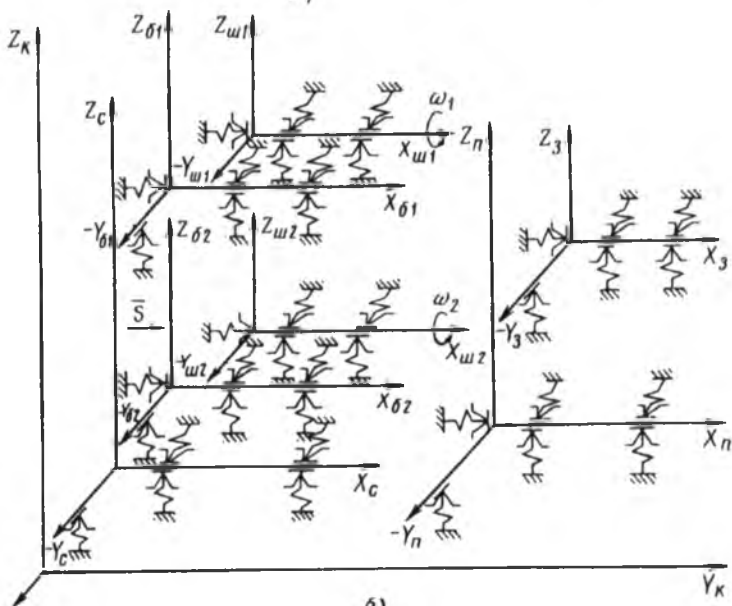
Главной причиной взаимного влияния действующих факторов является особенность конструкции, характерная для любого многоинструментного станка, заключающаяся в наличии общих звеньев размерных цепей, замыкающими звеньями которых являются относительные положения режущих кромок инструментов и технологических баз заготовки.

На рис. 1.9.7, *а* показан двухшпиндельный агрегатный расточный станок. В процессе обработки детали отверстия формируются в результате движения режущих кромок резцов относительно технологических баз заготовки. Текущими значениями положения вершин резцов в плоскости чертежа являются замыкающие звенья: размеры A_Δ и B_Δ – расстояния между вершинами соответственно резцов 1 и 2 и базами заготовки. Поскольку обе шпиндельные головки располагаются на одном основании, то общими звеньями в их размерных цепях будут составляющие звенья от основания до станины.

Следовательно, во время обработки одновременно двух отверстий (рис. 1.9.7, *а*) силы резания от резца на первом шпинделе, вызывая упругие перемещения звеньев размерной цепи A , вызовут через упругие перемещения общих звеньев погрешность обработки не только на обрабатываемом отверстии 1, но и на отверстии 2 (рис. 1.9.7, *а*). Таким же образом силы резания от резца, действующие при обработке отверстия 2 на втором шпинделе, вызовут погрешность обработки отверстия 1.



а)



б)

Рис. 1.9.7. Двухшпindleльный агрегатный расточный станок (а) и его эквивалентная схема (б)

Такая же картина наблюдается и при обработке на других многоинструментных станках параллельного действия. Например, при обработке на многолезцовом токарном станке ступенчатого вала, когда одновременно формируются несколько ступеней. Чем больше число общих звеньев в размерных цепях у таких технологических систем, тем больше взаимное влияние действующих факторов.

При одноинструментной обработке технологическая система находится под воздействием одной силы резания, которая изменяется, главным образом, по величине и координатам точки приложения. При многоинструментной обработке технологические системы находятся под воздействием системы сил резания, изменяющихся во времени не только по величине и координатам точек приложения, но и по своему числу и очередности действия. Изменение числа действующих сил резания определяется компоновкой станка, конструкцией обрабатываемой детали, инструментальной наладкой и выбранной последовательностью обработки поверхностей.

Изменение относительного расположения действующих сил резания зависит от принятой последовательности обработки отверстий детали на агрегатном станке и несовпадения частот вращения шпинделей. Различие величин сил резания зависит от фактического распределения припуска на обрабатываемых поверхностях, геометрии режущего инструмента, степени его затупления.

Как показывают исследования, точности многоинструментной обработки, изменение погрешностей может быть как плавным, так и скачкообразным. Это объясняется, во-первых, изменяющимся во времени составом действующих факторов, во-вторых, неодновременностью действия факторов у разных режущих инструментов и, в-третьих, изменением величины действующих факторов. Описание механизма образования погрешностей многоинструментной обработки позволит находить схему расположения инструментов, последовательность их работы, режимы обработки, обеспечивающие наивысшую точность.

Вернемся к рис. 1.9.7, где показаны агрегатный двухшпиндельный расточной станок, скомпонованный из двух одношпиндельных расточных бабок и силового гидравлического стола, и его эквивалентная схема и рассмотрим расчет погрешностей растачивания двух отверстий. Координатные системы построены следующим образом: Σ_z – на технологических базах заготовки; Σ_n – на основных базах приспособления; Σ_c – на основных базах силового стола; Σ_{bi} – на основных базах i -й расточной бабки; $\Sigma_{ш_i}$ – на основных базах i -го шпинделя. В качестве неподвижной системы отсчета принята координатная система Σ_k , построенная на направляющих станины.

Для определения траектории движения вершины i -го режущего инструмента с вершиной в точке M_i в системе детали Σ_z , выводится уравнение относительного движения посредством перевода координат точки M_i из системы $\Sigma_{ш}$ через все координатные системы в систему детали Σ_z .

Окончательный вид уравнения относительного движения будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \bar{r}_{zi}^i = & M_z M_n M_c M_{\delta i} M_{ш} M'_{ш} \bar{r}_{ш} + M_z M_n M_c M_{\delta i} r_{0ш} + \\ & + M_z M_n M_c \bar{r}_{0\delta i} + M_z M_n (\bar{r}_{0c} + \bar{s}_c + \bar{r}_{0n}) - M_z \bar{r}_{0n} - \bar{r}_{0z}, \end{aligned} \quad (1.9.1)$$

где M_i – матрицы, определяющие относительные повороты координатных систем: Σ_z , Σ_n , Σ_c , $\Sigma_{\delta i}$, $\Sigma_{ш}$; $M'_{ш}$ – матрица поворота, учитывающая вращение координатной системы шпинделя в соответствии с движением формообразования; $\bar{s}_c$ – вектор перемещения, характеризующий движение подачи, выполняемое силовым столом в соответствии с движением формообразования; $\bar{r}_{ш}^i$ – радиус-вектор, определяющий положение точки M_i поверхности i -го отверстия в координатной системе заготовки; $\bar{r}_{ш}$ – радиус-вектор точки M_i в системе $\Sigma_{ш}$; $\bar{r}_{0ш}$, $\bar{r}_{0\delta i}$, $\bar{r}_{0c}$, $\bar{r}_{0n}$, $\bar{r}_{0z}$ – радиус-векторы, определяющие положения начала координатных систем соответственно $\Sigma_{ш}$, $\Sigma_{\delta i}$, Σ_c , Σ_n и Σ_z .

Для того чтобы определить погрешность обработки на каждом из i совместно изготавливаемых отверстий, достаточно решить уравнение (1.9.1) i раз, подставляя соответствующие для каждого шпинделя параметры.

Взаимное влияние действующих факторов при обработке других отверстий на точность растачиваемых отверстий проявляется через перемещения и повороты общих звеньев технологической системы, которые зависят от перемещений опорных точек.

Зависимости, определяющие отклонения параметров уравнения относительного движения вследствие перемещений опорных точек координатных систем, приведенных на рис. 1.9.7, б, показаны ниже. Отклонения шести параметров, характеризующих положение:

системы Σ_z в системе Σ_n

$$\Delta x_{0z} = \lambda_{6z} + y_{36z} \operatorname{tg} \Delta \theta_3; \quad \Delta \varphi_3 = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{1z}}{y_{31z}}; \quad (1.9.2)$$

$$\Delta y_{03} = \lambda_{43} + x_{343} \operatorname{tg} \Delta \theta_3; \quad \Delta \psi_3 = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{33} - \lambda_{23}}{x_{333} - x_{323}};$$

$$\Delta z_{03} = \lambda_{23} + y_{323} \operatorname{tg} \Delta \psi_3; \quad \Delta \theta_3 = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{53} - \lambda_{43}}{x_{353} - x_{343}};$$

системы Σ_n в системе Σ_k :

$$\Delta x_{0n} = \lambda_{6n} + x_{n6n} \operatorname{tg} \Delta \theta_n; \quad \Delta \varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{1n}}{y_{n1n}};$$

$$\Delta y_{0n} = \lambda_{4n} + x_{n4n} \operatorname{tg} \Delta \theta_n; \quad \Delta \psi_n = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{3n} - \lambda_{2n}}{x_{n3n} - x_{n2n}}; \quad (1.9.3)$$

$$\Delta z_{0n} = \lambda_{2n} + y_{n2n} \operatorname{tg} \Delta \psi_n; \quad \Delta \theta_n = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{3n} - \lambda_{4n}}{x_{n3n} - x_{n4n}};$$

системы Σ_{wi} в системе $\Sigma_{\delta i}$:

$$\Delta x_{0wi} = \lambda_{6wi}; \quad \Delta \varphi_{wi} = 0;$$

$$\Delta y_{0wi} = \lambda_{3wi} + x_{w3wi} \operatorname{tg} \Delta \theta_{wi}; \quad \Delta \psi_{wi} = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{2wi} - \lambda_{1wi}}{x_{w2wi} - x_{w1wi}};$$

$$\Delta z_{0wi} = \lambda_{w1wi} \operatorname{tg} \Delta \psi_{wi}; \quad \Delta \theta_{wi} = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{4wi} - \lambda_{3wi}}{x_{w4wi} - x_{w3wi}}; \quad (1.9.4)$$

системы $\Sigma_{\delta i}$ в системе Σ_c :

$$\Delta x_{0\delta i} = \lambda_{6\delta i} + x_{\delta 6\delta i} \operatorname{tg} \Delta \theta_{\delta i}; \quad \Delta \varphi_{\delta i} = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{1\delta i}}{y_{\delta 1\delta i}};$$

$$\Delta y_{0\delta i} = \lambda_{4\delta i} + x_{\delta 4\delta i} \operatorname{tg} \Delta \theta_{\delta i}; \quad \Delta \psi_{\delta i} = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{3\delta i} - \lambda_{2\delta i}}{x_{\delta 3\delta i} - x_{\delta 2\delta i}}; \quad (1.9.5)$$

$$\Delta z_{0\delta i} = \lambda_{2\delta i} + y_{\delta 2\delta i} \operatorname{tg} \Delta \psi_{\delta i}; \quad \Delta \theta_{\delta i} = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{5\delta i} - \lambda_{4\delta i}}{x_{\delta 5\delta i} - x_{\delta 4\delta i}};$$

системы Σ_c в системе Σ_k :

$$\Delta x_{0c} = 0; \quad \Delta \varphi_c = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{1c}}{y_{c1c}};$$

$$\Delta y_{0c} = \lambda_{4c} + x_{c4c} \operatorname{tg} \Delta \theta_c; \quad \Delta \psi_c = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{3c} - \lambda_{2c}}{x_{c3c} - x_{c2c}};$$

$$\Delta z_{0c} = \lambda_{2c} + y_{c2c} \operatorname{tg} \Delta \psi_c; \quad \Delta \theta_c = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{5c} - \lambda_{4c}}{x_{c5c} - x_{c4c}}. \quad (1.9.6)$$

Обозначения опорных точек можно показать на примере положения системы $\Sigma_{\delta i}$ в системе Σ_c . Так, координату одной точки системы $\Sigma_{\delta i}$ можно записать в виде $x_{\delta 5 \delta i}$, где δ – индекс, указывающий, что данная точка рассматривается в системе $\Sigma_{\delta i}$; 5 – номер опорной точки; δi – индекс, обозначающий, какой координатной системе принадлежит данная опорная точка.

Совокупность математических уравнений (1.9.1) – (1.9.6) представляет собой математическую модель механизма образования погрешностей обработки деталей растачиванием на двухшпиндельном агрегатном станке.

С помощью эквивалентной схемы данной технологической системы влияние упругих перемещений на точность обработки может быть учтено через упругие перемещения опорных точек координатных систем. Упругое перемещение i -й опорной точки $\lambda_i = f(P_i, j_{\text{пр}i})$, где P_i – сила, действующая на i -ю опорную точку; $j_{\text{пр}i}$ – приведенная жесткость, в i -й опорной точке, учитывающая жесткости всех звеньев технологической системы, заключенных между смежными координатными системами.

Для выполнения расчетов в соответствующих координатных системах определяются действующие силы, как это показано на рис. 1.9.8, а и б, на примере координатных систем $\Sigma_{\text{ш}}$ и Σ_c , где M_i – точка приложения силы резания P_i ; O_G – точка приложения веса G_i звена технологической системы. $R_{j\text{ш}i}$, $R_{j\delta i}$ – реакции в опорных точках координатных систем шпинделя, силовых бабок и силового стола. Затем с помощью уравнений статики определяются реакции в опорах координатных систем, причем реакции предыдущей системы вносятся в следующую систему в виде внешних сил с обратным знаком.

Упругие прогибы расточных оправок y_{0i} находятся по известной формуле для расчета жесткозашемленной консольной балки:

$$y_{0i} = \frac{P_{yi} l_{0i}^3}{3EJ} + \frac{P_{xi} (R_{0i} + l_{pi}) l_{0i}^3}{3EJ} + \frac{P_{zi} l_{0i}^3}{3EJ},$$

где R_{0i} – радиус i -й оправки; l_{pi} – вылет реза; l_{0i} – длина консольной части i -й оправки от реза до торца шпинделя.

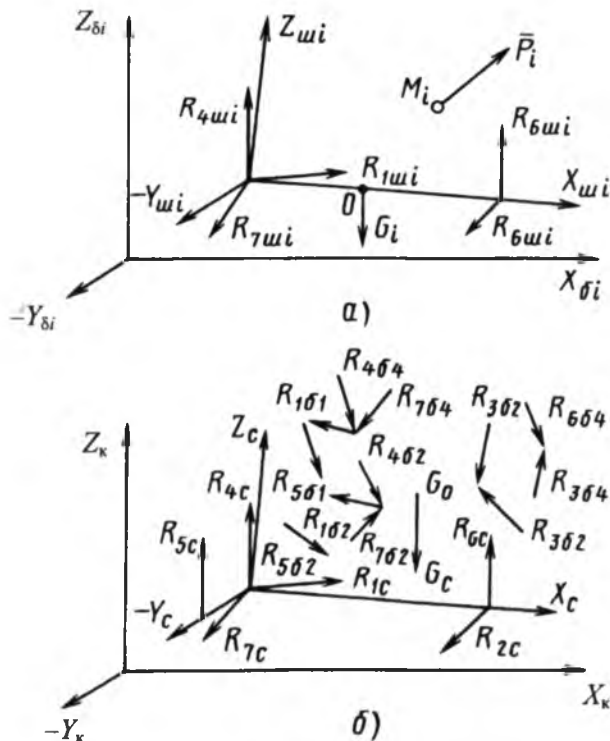


Рис. 1.9.8. Силы, действующие в координатных системах:
 а – шпинделя Σ_{wi} ; б – силового стола Σ_c

Подставляя в уравнение относительного движения (1.9.1) значения его параметров, определяемых по (1.9.2) – (1.9.6), вычисляют радиус отверстия в рассматриваемой i -й точке детали. Аналогичным образом производят расчеты для любого числа точек поверхности в секущей плоскости детали. Переходя от одного поперечного сечения к другому по длине отверстия, можно оценить отклонения параметров точности получаемых отверстий от заданных чертежом.

Приняв за основу построенную математическую модель, расчет погрешностей обработки проводится в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 1.9.9.

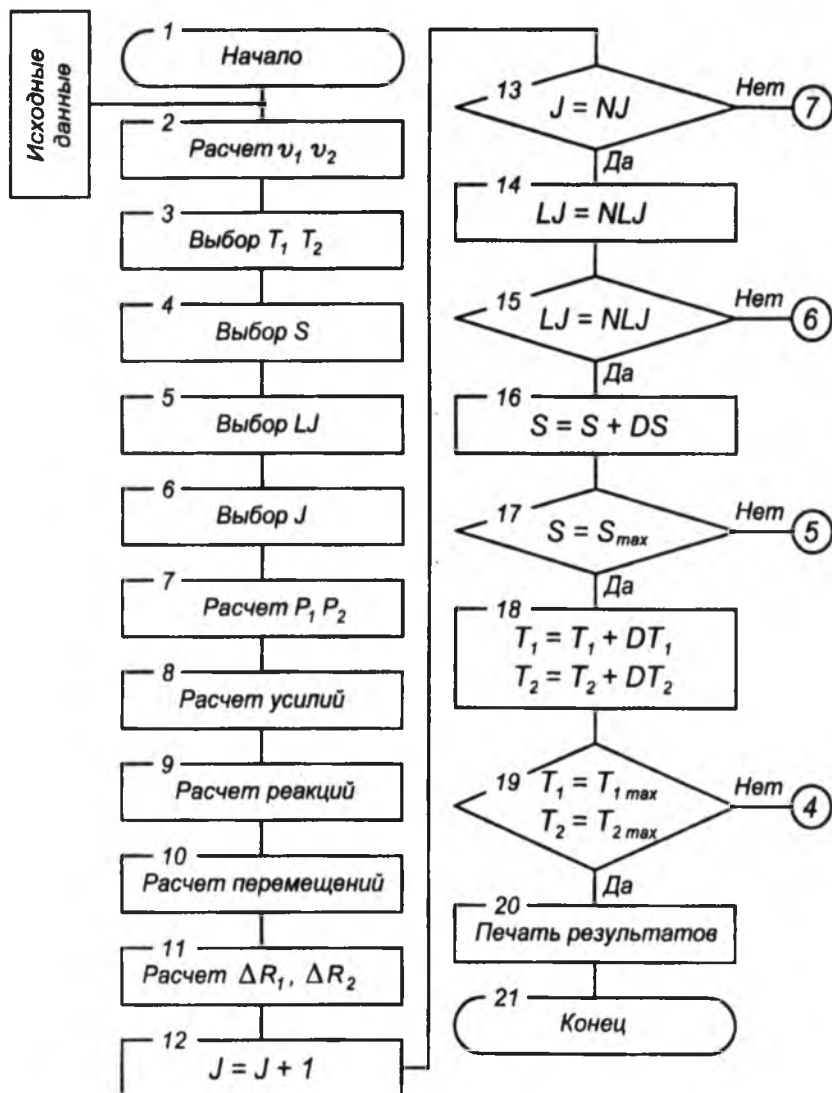


Рис. 1.9.9. Алгоритм расчета погрешности обработки на агрегатном двухшпиндельном расточном станке

После выдачи компьютеру задания на начало работы вводятся: массив исходных данных, охватывающий режимы резания с пределами их изменения для каждого инструмента; размеры обрабатываемых отверстий; геометрия режущих инструментов; величины и характер изменения припусков на каждой поверхности обработки; твердость материала заготовки; параметры станка; число поперечных сечений отверстий и точек в них, в которых рассчитывается погрешность обработки и др.

Алгоритм работает следующим образом:

- вычисляются скорости резания на каждом шпинделе v_1 ; v_2 – оператор 2;
- из заданных выбираются минимальные глубины резания T_1 , T_2 – оператор 3;
- подача S – оператор 4;
- первое поперечное сечение LJ – оператор 5 и начальная точка в нем J – оператор 6;
- если припуск задается конусным или эксцентричным, то уточняется глубина резания для данной точки обрабатываемой поверхности и определяются силы резания на каждом шпинделе P_1 , P_2 – оператор 7;
- производится расчет сил, действующих на звенья технологической системы, реакций в их опорных точках, а также перемещений и поворотов координатных систем, связанных со звеньями технологической системы, в результате вычисляются погрешности обработки первого и второго отверстий в рассматриваемых точках ΔR_1 , ΔR_2 – оператор 11;
- по приведенному алгоритму производятся расчеты для всего заданного числа точек в первом поперечном сечении NJ ;
- после этого делается переход к следующему поперечному сечению (оператор 14), и операции повторяются до тех пор, пока не будут рассчитаны все поперечные сечения NLJ и точки в них.

Аналогичные действия, начиная с первого сечения и первой точки в нем, выполняются после изменения режимов обработки (S , T и др.) для каждого из новых условий.

На печать могут выводиться результаты вычислений сил резания, значения реакций в опорных точках и их перемещений, погрешности радиусов отверстий для каждой рассматриваемой точки поверхности отверстия и другие данные.

Соответствие математической модели реальной технологической системе проверяется по следующей методике. В процессе установившейся работы станка обрабатываются отверстия с постоянным припуском. Для этих же условий выполняется расчет и устанавливается расхождение результатов, полученных экспериментальным и расчетным путем.

Для проверки разработанной модели проведены расчеты погрешностей обработки двух отверстий на агрегатном двухшпиндельном расточном станке и сопоставлены с результатами измерения погрешностей обработки. В качестве исходных данных были приняты: жесткость технологической системы 29 000 Н/мм; частота вращения шпинделей $n_1 = n_2 = 400 \text{ мин}^{-1}$, подача $S = 0,2 \text{ мм/об}$, диаметры обрабатываемых отверстий 100 мм, главный угол в плане резцов $\varphi = 45^\circ$. Сопоставление результатов расчета погрешностей с измеренными значениями показало расхождение в пределах 20 %.

Понимание взаимного влияния на погрешность обработки разными инструментами позволяет при проектировании многоинструментных наладок находить решения, позволяющие существенно повысить точность обработки, а именно: правильно выбирать относительное расположение инструмента, режимы обработки, последовательности и совмещение переходов. В связи с этим представляет интерес исследование методом математического моделирования влияния различного распределения припуска, изменения его величины по двум отверстиям на точность растачивания отверстий.

Исследования проводились для следующих условий:

Материал заготовки – сталь 45; углы резцов $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$; резцы оснащены пластинами из твердого сплава Т15К6; диаметр конусных оправок 60 мм, вылет 150 мм. Отношение жесткости общих звеньев размерной цепи к жесткости остальных звеньев составляло в среднем 1,45.

При одновременном растачивании двух отверстий (рис. 1.9.7, а) рассмотрены следующие варианты распределения припуска: ступенчатое изменение припуска и эксцентричное расположение припуска – в обоих отверстиях и только в одном. Кроме того, рассмотрен случай обработки с неодновременным началом работы резцов (второй резец вступает в работу после того, как первый резец уже обработал часть первого отверстия).

Анализ графиков, приведенных на рис. 1.9.10 и 1.9.11, показывает следующее. Если припуск эксцентричен в отверстии 1 (см. рис. 1.9.7, а), то погрешность формы и смещение оси возникают в обоих отверстиях, но в отверстии 2 их значения меньше (рис. 1.9.10). Если припуск эксцентричен в обоих отверстиях 1 и 2 и векторы эксцентриситета направлены в противоположные стороны, то погрешность формы и смещение оси у обоих отверстий примерно одинаковы; при этом смещения осей направлены в противоположные стороны (рис. 1.9.11).

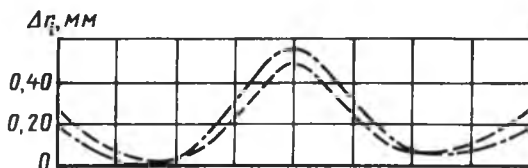


Рис. 1.9.10. Погрешность обработки при эксцентричном припуске в отверстии 1 (см. рис. 1.9.7, а):

— • — • — для отверстия 1; — — — — — для отверстия 2

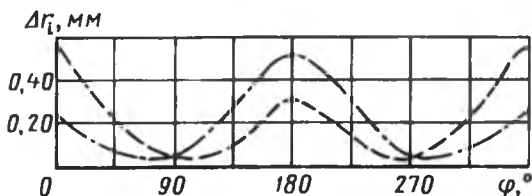


Рис. 1.9.11. Погрешность обработки при эксцентричном припуске в отверстиях 1 и 2 (см. рис. 1.9.7, а):

— • — • — для отверстия 1; — — — — — для отверстия 2

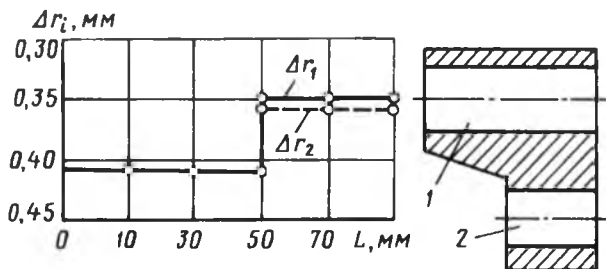


Рис. 1.9.12. Изменение погрешностей растачивания двух отверстий с $S = 0,3$ мм/об по длине детали при неодновременном начале работы резцов:

— — — — — в отверстии 1; — — — — — в отверстии 2

В практике многошпиндельной обработки часты случаи, когда из-за разной длины обрабатываемых отверстий, различия в режимах резания, конструктивных особенностей обрабатываемой детали и наладок начало и окончание работы резцов не совпадают. На рис. 1.9.12 показана деталь и графики изменения радиуса обоих обработанных отверстий. Поскольку

растачивание отверстия 2 начинается позже, чем отверстия 1, то радиус отверстия 1, когда начинается растачивание отверстия 2, изменяется скачкообразно, т.е. происходит ступенчатое уменьшение диаметра.

Из изложенного наглядно видно взаимное влияние на погрешность обработки факторов, действующих на каждом инструменте, и чем больше в наладке инструментов, тем сложнее устанавливать их взаимное влияние и тем эффективнее применение метода математического моделирования. Рассмотрим в качестве примера определение относительного углового расположения резцов на трех расточных оправках, обеспечивающих наивысшую точность при растачивании в корпусной детали трех параллельных отверстий на агрегатном трехшпиндельном расточном станке.

С этой целью, так же как и для двухшпиндельного, была построена математическая модель механизма образования погрешностей обработки для трехшпиндельного расточного станка. Было проведено исследование точности растачивания трех отверстий для различного относительного углового расположения резцов на трех расточных оправках при разной геометрии резцов.

Общие *исходные данные*: глубина резания в трех отверстиях $t_1 = t_2 = t_3 = 6$ мм; подача $S = 0,25$ мм/об; скорость резания $v = 62,8$ м/мин; главный угол резца в плане $\phi = 45^\circ$; жесткость в опорных точках – 975,1 кН/мм. В табл. 1.9.3 приведены исходные данные и результаты исследования влияния геометрических параметров резца, расположения резцов и шпинделей на погрешность диаметрального размера в каждом из трех обрабатываемых отверстий.

В качестве одного из геометрических параметров режущей части резца, оказывающего наибольшее влияние, является главный угол ϕ в плане. Из табл. 1.9.3 (первая схема расположения резцов) следует, что при изменении ϕ с 45° на 90° погрешности диаметральных размеров в каждом из трех отверстий уменьшились в 1,9 ... 2 раза.

Особенно большое влияние на точность обработки оказывает относительное угловое расположение резцов на шпинделях: в табл. 1.9.3 приведены схемы 1 – 4 относительного расположения резцов; сопоставление погрешностей диаметрального размера по абсолютной величине показало уменьшение погрешности в первом отверстии ~ в 5 раз, во втором отверстии – более чем в 17 раз и в третьем отверстии – в 5,5 раз.

Значительное влияние на точность обработки оказывает и расположение шпинделей относительно заготовки. В табл. 1.9.3 (см. схемы 4 – 6)

Таблица 1.9.3

Схема расположения резцов	Погрешность диаметра отверстий, мм			Исходные данные	
	первое	второе	третье		
	0,840	0,773	0,707	$\varphi = 45^\circ$	$\alpha_1 = \alpha_2 =$ $= \alpha_3 = 0^\circ$
	0,441	0,391	0,340	$\varphi = 90^\circ$	
	0,630	-0,503	0,552	$\alpha_1 = \alpha_3 = 0^\circ$ $\alpha_1 = 270^\circ$	
	0,350	0,128	-0,231	$\alpha_1 = 0^\circ$ $\alpha_2 = 270^\circ$ $\alpha_3 = 180^\circ$	
	0,157	-0,045	0,124	$\alpha_1 = \alpha_3 = 0^\circ$ $\alpha_2 = 180^\circ$	
	0,312	—	0,244	$t_2 = 0$	
	—	0,260	0,297	$t_1 = 0$	

Знак " — " означает увеличение диаметра отверстия по сравнению с номинальным его значением.

приведены также результаты расчета погрешностей диаметрального размера в трех и двух отверстиях, однако в каждой из двух последних схем расположения шпинделей обрабатывались разные пары отверстий из трех в соответствии со схемой расположения шпинделей.

Учет всех этих факторов при проектировании многоинструментной наладки позволит более полно использовать резервы повышения точности и производительности обработки.

1.9.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Изготовление деталей на станках характеризуется большим разнообразием технологических процессов, многовариантностью конструктивных решений технологических систем, условий обработки.

Поэтому для правильного построения технологических процессов и средств их технологического оснащения требуется исследование механизма образования погрешностей, установление зависимостей между погрешностями обработки и причинами, их порождающими, не только на качественном уровне, но и на количественном.

Ниже рассматриваются примеры исследования механизма образования погрешностей обработки методом математического моделирования.

1.9.4.1. Исследование влияния элементов режима обработки на точность

Элементы режима обработки, к которым относятся глубина резания, подача, скорость резания, оказывают влияние на погрешность обработки главным образом через силу резания, вызывающую упругие перемещения относительного положения заготовки и инструмента.

При выборе значений элементов режима резания погрешность обработки выступает как ограничение, поэтому при назначении режимов обработки надо знать зависимость между элементами режима обработки и погрешностью обработки.

В силу изменчивости условий обработки, уровня качества технологической системы не представляется возможным в справочной литературе приводить значения погрешностей обработки для всех сочетаний элементов режима резания, поэтому в каждом конкретном случае необходимо вычислять эту погрешность и определять доминирующее влияние того или иного элемента режима процесса. Эффективно решить эти задачи можно только методом математического моделирования на ЭВМ.

Примем в качестве объекта исследования токарную обработку и установим зависимости между глубиной резания, скоростью резания и величиной погрешности обработки. Для установления указанных зависимостей используем математическую модель токарного станка (см. п. 1.8.4). Моделирование токарной обработки проводилось для следующих условий: обрабатывался вал из стали 45 длиной $L = 400$ мм и $d = 60$ мм при базировании в центрах с односторонним поводком.

На рис. 1.9.13 показано изменение погрешности радиус-вектора детали в функции угла поворота для разных значений t и v . Как следует из рис. 1.9.13, изменение скорости резания в 3 раза оказывает меньшее влияние на погрешность обработки, чем изменение глубины резания в 2 раза. Чтобы воспользоваться полученными данными в практических

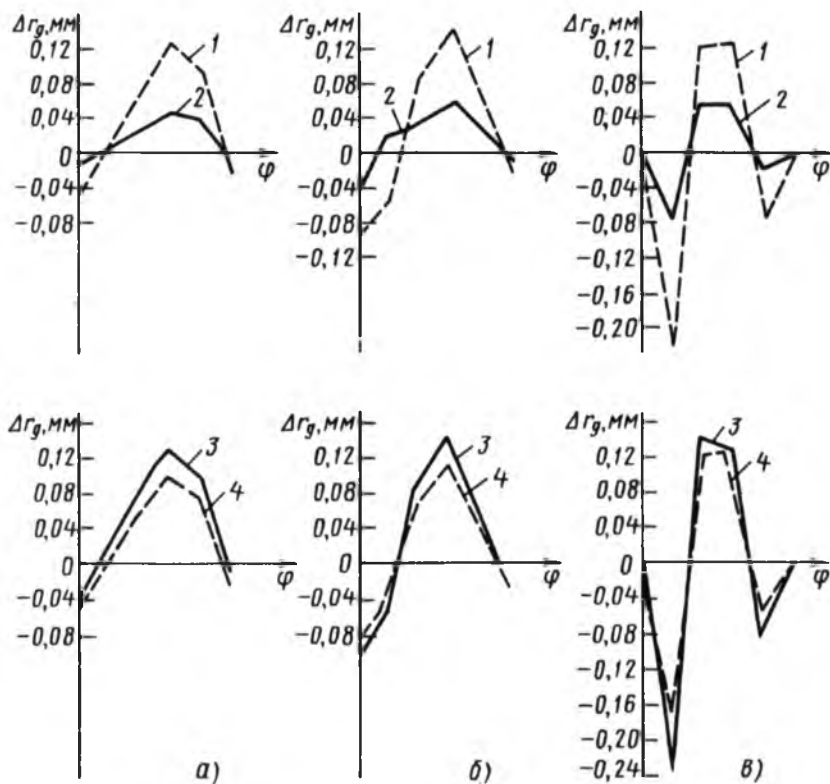


Рис. 1.9.13. Изменение погрешности обработки при разных значениях l и v :

a – у левого торца вала; $б$ – в середине вала; $в$ – у правого торца вала;

$1 - t_2 = 4$ мм; $2 - t_1 = 4$ мм; $3 - v_1 = 50$ м/мин; $4 - v_2 = 150$ м/мин

целях, надо полученные зависимости привести к зависимостям погрешность детали – элементы режима обработки.

Как уже отмечалось в гл. 1.8, поскольку погрешность детали определяется по методике, зависящей от ее служебного назначения, то в качестве погрешности обработки приняли $\Delta \bar{r}_i$.

Аналогичным образом устанавливаются зависимости между погрешностью обработки и режимами для других технологических систем.

1.9.4.2. Исследование влияния силового фактора на точность обработки

Во время обработки заготовок на станке действуют различные силы, поэтому представляет практический интерес исследование влияния каждой из них на погрешность обработки, что позволит установить силы, оказывающие доминирующий характер на погрешность обработки, и определить, на какой показатель точности они влияют; на этой основе предусмотреть соответствующие мероприятия по сокращению погрешности обработки.

Рассмотрим пример токарной обработки вала в центрах с односторонним поводком. Технологическая система находится под воздействием: силы резания; силы, передаваемой поводком; центробежной силы, обусловленной неуравновешенностью заготовки и массой вращающихся деталей технологической системы. Чтобы исследовать влияние каждой из перечисленных сил на точность обработки экспериментальным методом, приходится сводить к минимуму влияние других сил, а это сложно и не всегда возможно. Например, нельзя уменьшить массу деталей или исключить действия какой-либо составляющей силы резания. Применение метода математического моделирования позволяет это делать.

Влияние силового фактора на погрешность обработки сказывается через упругие перемещения технологической системы, которые, в свою очередь, зависят от жесткости элементов технологической системы. Поэтому, чтобы исследовать механизм образования погрешности обработки под воздействием силового фактора, надо знать упругие перемещения элементов технологической системы и их влияние на погрешность обработки. С этой целью воспользуемся эквивалентной схемой технологической системы токарного станка.

На рис. 1.9.14 показан токарный станок с координатными системами: Σ_d , построенной на технологических базах заготовки (левый торец и технологическую ось, соединяющую оси центровых отверстий); Σ_n , построенной на посадочных шейках шпинделя и переднего торца шпинделя; Σ , которая строится на направляющих станины и Σ_n , построенной на исполнительных поверхностях резцедержателя.

Методом математического моделирования токарной обработки валов на универсальном токарно-винторезном станке была получена картина упругих перемещений в каждой из опорных точек координатных систем Σ_n , Σ_n , Σ_z , имеющих место во время обработки. Упругие перемещения рассчитывались для следующих условий: обрабатывался вал из стали 45 диаметром 60 мм и длиной $L = 400$ мм; резцом с углами $\alpha = 12^\circ$, $\gamma = 5^\circ$,

Для расчетов жесткость каждой из опорных точек была принята равной 50 000 Н/мм.

Теперь процесс образования упругого перемещения на замыкающем звене можно рассматривать как функцию изменения упругих перемещений каждой опоры в зависимости от поворота заготовки. На рис. 1.9.14 показаны зависимости этих перемещений при обработке трех поперечных сечений (1, 3, 5) детали, расположенных по ее длине через равные промежутки.

Рассмотрим образование погрешности обработки, вызванной упругими перемещениями, с обработки крайнего правого поперечного сечения детали, расположенного у задней бабки станка. Все перемещения опорных точек координатных систем при обработке этого сечения показаны на рис. 1.9.14 сплошной линией. Из графиков следует, что изменения упругих перемещений λ_4 , опорной точки 4, координатной системы Σ_3 относительно координатной системы Σ_n за оборот подчиняются синусоидальной зависимости, а графики перемещений λ_{23} точки 2, — подчиняются той же зависимости, только со смещением по фазе на 90° , так как точка 2, повернута относительно точки 4, на 90° . Наличие гармонических колебаний указанных упругих перемещений в течение оборота детали объясняется тем, что деталь вращается вместе со шпинделем, поэтому опорные точки вращаются относительно постоянного по направлению действия силы резания, в результате на опоры действует сила резания $P \cos \varphi$. Перемещения $\lambda_{3д}$ и $\lambda_{1д}$ опорных точек 3_д и 1_д координатной системы $\Sigma_д$, расположенных у передней бабки, по характеру совпадают с перемещениями соответственно $\lambda_{4д}$ и $\lambda_{2д}$, но амплитуды их перемещений значительно меньше, что объясняется удаленностью точки приложения вектора силы резания по оси $X_д$. Кроме того, все графики упругих перемещений $\lambda_{3д}$ при обработке всех трех сечений смещены вверх по оси ординат. Это смещение вызвано действием силы P_n , передаваемой односторонним поводком, расположенным на оси Z_n и направленной по оси Y_n .

Перемещения $\lambda_{5д}$ опоры 5_д вдоль оси X_n во всех случаях одинаковы, как и перемещения $\lambda_{6д}$ поводка.

В итоге перемещений опорных точек координатной системы $\Sigma_д$ при обработке детали у задней бабки радиус-вектор установки заготовки $\vec{r}'_y$ оказывается переменным в течение оборота, как по величине, так и по направлению (см. рис. 1.9.14, графики $\vec{r}'_y - \varphi, \beta_y - \varphi$). В соответствии с выводами по исследованию влияния отклонений размерных параметров относительного движения на точность обработки изменение $\vec{r}'_y$ одновре-

менно по величине и направлению должно вызвать на детали в поперечном сечении погрешность в виде смещения профиля (эксцентриситета) и геометрической формы.

Рассмотрим перемещения опорных точек координатной системы Σ_n относительно координатной системы Σ (принимаемой за неподвижную систему) при обработке заготовки у задней бабки. Из графиков $\lambda_{1n} - \varphi$; $\lambda_{2n} - \varphi$; $\lambda_{3n} - \varphi$; $\lambda_{4n} - \varphi$; $\lambda_{5n} - \varphi$ видно, что упругие перемещения опорных точек $1_n, 2_n, 3_n, 4_n, 5_n$ координатной системы Σ_n в течение оборота детали остаются постоянными по величине. При обработке заготовки в других сечениях они также постоянны в течение оборота и отличаются лишь величиной, что объясняется изменением координаты точки приложения вектора силы резания. Аналогичная картина наблюдается в упругих перемещениях опорных точек $1_n - 5_n$ координатной системы Σ_n за исключением того, что величины перемещений постоянны и при обработке заготовки по всей длине, так как изменение координаты точки приложения силы резания по длине детали на перемещения системы Σ_n практически не влияет.

Отсюда следует, что радиус-вектор настройки $\vec{r}'_n$ в течение оборота детали сохраняется постоянным и, следовательно, все искажения и смещения профиля поперечных сечений детали обусловлены изменением только радиус-вектора установки.

Радиус-вектор настройки $\vec{r}'_n$ изменяется только по величине вдоль заготовки, что приводит к погрешности диаметрального размера и геометрической формы в продольном сечении.

На рис. 1.9.14 также показаны пять профилей сечений детали, построенных в виде круглограмм по результатам математического моделирования, которые наглядно показывают, как изменяется смещение профиля относительно оси, являющейся технологической базой, и как постепенно меняются от передней к задней бабке размеры поперечных сечений и их форма.

Картина упругих перемещений опорных точек показывает, как ведет себя не только каждая деталь размерной цепи радиуса детали в поперечном сечении в каждый момент обработки, но и каждая опорная точка, и это является не только качественной, но и количественной оценкой упругих перемещений.

Моделирование на ЭВМ позволяет вычислять погрешность обработки от каждой действующей силы, не нарушая процесс обработки. С целью анализа действия сил резания, тяжести, инерции и силы, передаваемой односторонним поводком, в качестве объекта исследования был

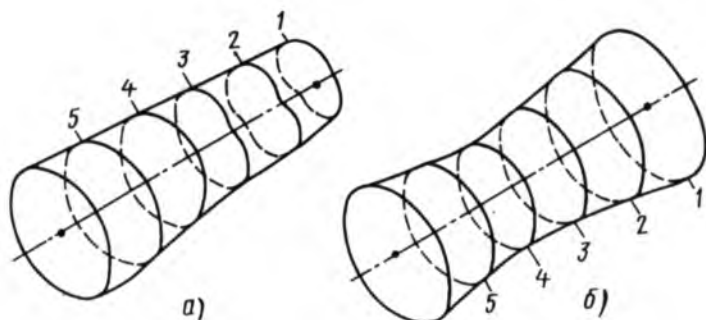


Рис. 1.9.15. Изменение погрешности обработки вала под действием силы P_x (а) и силы P_y (б)

принят процесс токарной обработки гладкого вала диаметром 95 мм из стали 45 длиной $L = 495$ мм, установленного в центрах с односторонним поводком с эксцентриситетом $e = 1,5$ мм. Обработка осуществлялась резцом с углами $\alpha = 12^\circ$, $\gamma = 5^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ и режимами резания $t = 4$ мм, $S = 0,4$ мм/об, $v = 200$ м/мин. Жесткости опор координатных систем были приняты равными: $j_{1д} = j_{2д} = j_{3д} = j_{4д} = j_{5д} = j_{6д} = 98\,000$ Н/мм; $j_{1п} = j_{3п} = j_{5п} = 19\,600$ Н/мм; $j_{2п} = 13\,720$ Н/мм; $j_{4п} = 11\,760$ Н/мм; $j_{2н} = j_{5н} = 78\,400$ Н/мм; $j_{3н} = j_{4н} = 49\,000$ Н/мм; $j_{1н} = 68\,600$ Н/мм.

Для приведенных выше условий обработки были рассчитаны силы P_z , P_y , P_x , P_n , Φ^r , G через каждые 30° поворота детали при обработке шести поперечных сечений детали, расположенных через равные промежутки по длине детали. По результатам математического моделирования токарной обработки рассчитаны упругие перемещения опорных точек координатных систем Σ_d , Σ_n , Σ_n , вызванные действием разного сочетания сил G ; $G + \Phi^r$; $G + \Phi^r + P_x$; $G + \Phi^r + P_x + P_y$; $G + \Phi^r + P_x + P_y + P_z$; $G + \Phi^r + P_x + P_y + P_z + P_n$. На основании этого расчета были определены (в качестве примера) погрешности обработки в пяти поперечных сечениях 1 – 5 под влиянием P_x (рис. 1.9.15, а) и силы P_y (рис. 1.9.15, б).

1.9.4.3. Исследование влияния жесткости технологической системы на точность обработки

Рассмотрим влияние на точность обработки жесткости опорных точек деталей технологической системы; такое исследование важно на этапе проектирования технологической системы. Его результаты позволяют оценивать принимаемые конструктивные решения, правильно использо-

вать дорогостоящий материал, применяя его в тех частях технологической системы, где требуется повышенная жесткость. Иными словами, результаты исследования влияния жесткости на точность позволяют принимать оптимальные решения на этапе проектирования технологической системы и тем самым повышать ее эффективность.

Такого рода исследования практически не осуществимы экспериментальными методами, тем более, если речь идет о построении новой технологической системы, не имеющей аналога. На базе предложенных математических моделей эта задача сравнительно просто решается методом моделирования на ЭВМ. В качестве примера исследуем влияние на точность обработки жесткости опорных точек технологических систем токарного станка.

Моделировался процесс токарной обработки для следующих условий: обрабатывали вал из стали 45 длиной $L = 400$ мм и диаметром $d = 60$ мм резцом с $\alpha = 12^\circ$, $\gamma = 5^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 10^\circ$, $r = 1$ мм, с режимами обработки $t = 6$ мм, $S = 0,4$ мм/об, $v = 100$ м/мин. При этом в одном случае изменялись значения жесткости в опорных точках 2_d и 4_d системы Σ_d , а в другом случае – жесткость в опорных точках 1_n , 3_n , 5_n системы Σ_n . Жесткость в этих опорных точках изменялась на 20 % от первоначального значения. Как следует из расчетов, изменение жесткости j на 20 % не оказывает существенного значения на точность обработки, однако можно заметить, что наибольшее влияние изменения жесткости сказывается в тех сечениях заготовки, которые ближе расположены к опорным точкам и в которых менялась жесткость.

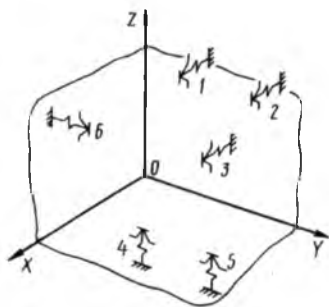


Рис. 1.9.16. Схема базирования корпуса шпиндельного узла вертикально-фрезерного станка

Рассмотрим другой пример – влияние изменения жесткости опорных точек на точность фрезерования на вертикально-фрезерном станке мод. 6Р12. Моделировалось изменение жесткости в опорных точках 1, 4, 6 корпуса шпиндельного узла станка, схема базирования которого показана на рис. 1.9.16. Проводились две серии экспериментов. В первой серии жесткость в перечисленных опорных точках увеличивалась на 50 % по сравнению с базовым вариантом, а во втором – уменьшалась на ту же величину. Жесткость в опорных точках по базовому варианту составляла: в первой опорной точке –

53 625 Н/мм; в шестой опорной точке – 65 826 Н/мм, в четвертой опорной точке – 40 885 Н/мм.

Расчеты погрешностей фрезерования производились по алгоритму, приведенному на рис. 1.9.4. Как показали результаты расчетов, изменение жесткости в опорных точках 1 и 6 не вызвало изменения погрешностей обработки. Это объясняется тем, что перемещение этих точек происходит в плоскости, перпендикулярной образованию размера детали. Изменение жесткости в опорной точке 4 изменило погрешность обработки до 5 раз.

1.9.4.4. Исследование влияния последовательности приложения силового замыкания на точность установки

При изготовлении высокоточных изделий существенно ужесточаются требования к точности установки заготовки, обрабатывающего инструмента и других сменных элементов технологической системы, а также деталей и сборочных единиц при их измерении и сборке.

В качестве примера можно привести установку резца для тонкого точения или растачивания, установку заготовки на чистовых операциях, когда припуск определяется несколькими сотыми миллиметра. В этих условиях начинает заметно проявляться на погрешности установки действие такого фактора, как последовательность положения силового замыкания. Сила зажима определяется исходя из необходимости обеспечения надежного контакта детали с другими деталями в машине и предупреждения ее смещения в процессе работы. В соответствии с этим к детали прикладывают одну или несколько сил, предварительно определив их значения, направление и место приложения.

В связи с этим возникает задача поиска такой последовательности приложения сил зажима, которая обеспечивала бы наименьшую погрешность установки. Рассмотрим эту задачу на примере установки детали в приспособление.

Погрешность установки определяется как отклонение фактического положения детали от заданного положения. При этом положение заготовки на станке, как тела в пространстве, можно характеризовать шестью параметрами: тремя перемещениями и тремя поворотами относительно выбранной системы координат. Тогда погрешность установки: Δx , Δy , Δz – погрешности размеров положения детали по трем направлениям; $\Delta \varphi$, $\Delta \psi$,

$\Delta\theta$ – погрешности относительных поворотов детали. Такой подход к определению погрешности установки позволяет однозначно определять её по шести параметрам, представляя их как повороты и перемещения координатной системы детали.

Под действием сил зажима детали возникает замкнутый силовой контур, охватывающий часть деталей размерной цепи технологической системы. Силовым контуром охватываются детали, расположенные между поверхностями зажимных элементов, контактирующих с деталью, и деталями, на которые устанавливается механизм зажима. Под действием каждой из сил зажима в стыках деталей, охватываемых силовым замыканием, возникают нормальные силы. При последовательном приложении к закрепляемой детали сил зажима в стыках нагруженной детали возникают силы трения F , изменяющиеся по величине, а в ряде случаев даже и по направлению, что вызывает изменение упругих перемещений закрепляемой детали. Силы трения возникают, как правило, в стыках устанавливаемой детали с деталями, нагруженными силами зажима, и в стыках детали с зажимными элементами этих сил.

На рис. 1.9.17 показана схема зажима детали последовательно прикладываемыми силами: сначала сила P_1 , потом сила P_2 . Под действием силы P_1 в опорных точках 1 – 3 возникают силы реакций $R_1 - R_3$. При приложении силы в этих опорных точках возникают силы трения $F_1 - F_3$, равные произведению силы реакции на коэффициенты трения в стыках детали с установочными элементами. Силы трения возникают также в стыках детали с зажимным элементом. При приложении силы P_1 возникает сила F_1 .

При последовательном приложении сил, приложение второй силы P_2 и ее фактическое воздействие на деталь окажется меньше расчетного, так как действуют силы трения от силы P_1 . Результатом этого являются меньшие реакции и, следовательно, меньшие упругие перемещения в опорных точках 4, 5.

Фактическое значение силы зажима P_2 (обозначим ее P_2') можно рассчитать:

$$P_2' = P_2 - (f_{R_1} R_1 + f_{R_2} R_2 + f_{R_3} R_3) - f_{P_1} P_1, \quad (1.9.7)$$

где P_2' – сила, фактически воздействующая на опорные точки 4, 5; P_2 – сила, приложенная к заготовке; f_{R_1} , f_{R_2} , f_{R_3} – коэффициенты трения детали соответственно с установочными элементами 1 – 3; f_{P_1} – коэффициент трения детали с зажимным элементом первой прикладываемой силы.

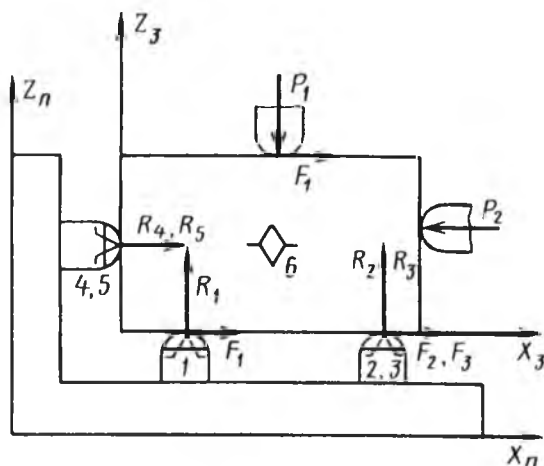


Рис. 1.9.17. Схема приложения силового замыкания при зажиме детали в приспособлении

Если ввести условие равенства коэффициентов трения заготовки в стыках с установочными элементами 1 – 3, формула (1.9.7) примет следующий вид:

$$P_2' = P_2 - P_1(f_1 + f_{P_1}), \quad (1.9.8)$$

где f_1 – коэффициент трения детали с установочными элементами, нагруженными первой силой.

С увеличением числа прикладываемых сил для каждой последующей силы эта зависимость меняется. Например, при трех последовательно прикладываемых силах зажима фактическое значение силы P_3 , прикладываемой последней, направленной на опору 6, определится из зависимости

$$P_3' = P_3 - P_1(f_1 - f_{P_1})(1 - f_2) - P_2(f_2 + f_{P_2}), \quad (1.9.9)$$

где P_3' – сила, фактически воздействующая на опорные элементы приспособления; f_1, f_2 – коэффициенты трения при контакте детали с установочными элементами, нагруженными соответственно первой P_1 и второй P_2 прикладываемыми силами; f_{P_1}, f_{P_2} – коэффициенты трения при контакте детали с зажимными элементами соответственно первой и второй прикладываемыми силами.

Моменты сил, действующие на деталь при последовательном приложении сил зажима, будут зависеть от относительного расположения сил зажима и элементов, на которые опирается деталь. Так, для рассматриваемого примера (см. рис. 1.9.17) сумма моментов сил, действующих на деталь при приложении силы P_2 , относительно оси Z_3 с учетом реакций в опорах 4, 5 будет иметь вид:

$$P_2 y_{P_2} - f_1 (R_1 y_1 + R_2 y_2 + R_3 y_3) - f_{P_1} P_1 y_{P_1} - R_4 y_4 - R_5 y_5 = 0, \quad (1.9.10)$$

где $y_1 - y_5$ — плечи, на которых действуют соответственно силы $R_1 - R_5$; y_{P_1} , y_{P_2} — плечи, на которых действуют силы соответственно P_1 и P_2 .

Таким образом, можно сделать вывод, что на изменение положения детали при силовом ее замыкании влияют не только значения сил, их направления и положение точек приложения, но и последовательность приложения этих сил. В связи с этим возникает необходимость определения наилучшей последовательности приложения сил зажима.

Учитывая участие достаточно большого числа действующих факторов, исследование влияния на погрешность установки последовательности силового замыкания целесообразно проводить методом математического моделирования на ЭВМ.

В процессе моделирования исследовалось влияние упругих перемещений на погрешность установки заготовки при разной последовательности силового замыкания. Рассматривались упругие перемещения опорных точек заготовки для одной схемы ее базирования при различном составе сил зажима и последовательности их приложения.

В модель были введены значения коэффициентов трения при контакте заготовки с установочными и зажимными элементами приспособления. По рассчитанным значениям реакций, возникающих в опорных элементах приспособления, определялись силы трения. По силе зажима определялась сила трения в стыке "заготовка — зажимной элемент". Эти силы представлялись как активные силы при расчете упругих перемещений заготовки от действия последующих сил зажима.

Было проведено три серии экспериментов соответственно по четырем схемам силового замыкания (рис. 1.9.18, а — в). В каждой серии экспериментов проводилось изменение варианта последовательности приложения сил зажима, их величин и коэффициентов трения, моделирующих различные конструкции установочных элементов приспособления и состояние технологических баз заготовки. Усилия зажима изменялись в диапазоне от $2 \cdot 10^3$ до 10^4 Н, что соответствует силам зажима,

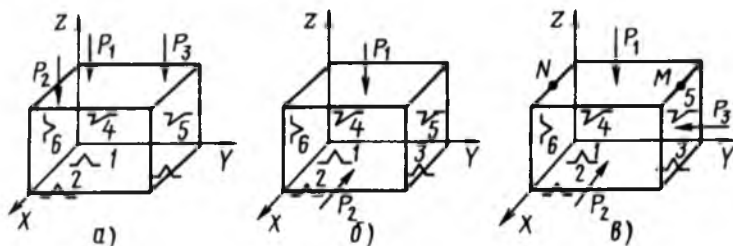


Рис. 1.9.18. Схемы сил зажима при установке детали:

а – три параллельные силы; б – две силы;

в – три силы по координатным осям

наиболее часто применяемым при зажиме корпусных деталей. При исследованиях моделировалась установка заготовки на опоры со сферической головкой, исходя из чего жесткость опорных точек принималась $8 \cdot 10^4$ Н/мм.

Полученные в результате исследований данные показали следующее. Последовательное приложение параллельных друг другу сил зажима, направленных на опоры, практически не оказывает влияние на изменение погрешности установки (рис. 1.9.18, а). Это видно из приведенных в табл. 1.9.4 значений погрешности установки, полученных при различных вариантах последовательности приложения сил зажима, равных 6000 Н.

Картина меняется, если изменяется последовательность приложения сил, составляющие которых направлены по нормальям к разноименным плоскостям комплекта технологических баз заготовки (рис. 1.9.18, б).

В табл. 1.9.4 приведены значения погрешности установки, соответствующие шести вариантам последовательного приложения трех сил зажима по схеме (рис. 1.9.18, в), показывающие влияние последних на погрешность установки. Данные значения получены при следующих условиях установки заготовки: силы зажима $P_1 = P_2 = P_3 = 6000$ Н; силы P_1 и P_2 приложены симметрично относительно опорных точек, что обеспечивало равенство реакций в опорных точках соответственно 1, 2, 3 и 4, 5, а сила P_3 – на точку 6; коэффициенты трения в стыках заготовки с установочными элементами равны 0,2, с зажимными элементами равны 0,3. Данные коэффициенты трения соответствуют установке заготовок необработанными поверхностями на опоры со сферической головкой и зажиму заготовки также по необработанным поверхностям.

Аналогичные изменения параметров погрешности установки в направлении прикладываемых сил зажима происходят при последовательном приложении двух сил (рис. 1.9.18, б). Это видно из табл. 1.9.4, где приведены значения параметров погрешности установки, соответствующие двум вариантам последовательного приложения двух сил зажима. Данные значения получены при указанных выше коэффициентах трения в стыках заготовки с элементами приспособления и силах зажима, равных 4000 Н.

Таблица 1.9.4

Эскиз	Последовательность приложения сил зажима	Погрешность установки					
		размерная, мм			угловая, °		
		Δx	Δy	Δz	$\Delta \varphi$	$\Delta \psi$	$\Delta \theta$
Рис. 1.9.18, а	P_1, P_2, P_3	0,012	0,123	-0,116	0,418	0,229	-0,037
	P_1, P_3, P_2	0,012	0,123	-0,116	0,418	0,229	-0,037
	P_2, P_1, P_3	0,012	0,123	-0,116	0,418	0,229	-0,037
	P_2, P_3, P_1	0,012	0,123	-0,116	0,418	0,229	-0,037
	P_3, P_1, P_2	0,012	0,123	-0,116	0,418	0,229	-0,037
	P_3, P_2, P_1	0,012	0,123	-0,116	0,418	0,229	-0,037
Рис. 1.9.18, в	P_1, P_2, P_3	0,26	0,121	0,000	0,399	0,202	-0,013
	P_1, P_3, P_2	0,27	0,116	0,005	0,399	0,195	-0,017
	P_2, P_1, P_3	0,18	0,138	-0,021	0,402	0,220	-0,008
	P_2, P_3, P_1	0,188	0,120	-0,031	0,414	0,223	-0,009
	P_3, P_1, P_2	0,279	0,096	-0,006	0,410	0,199	-0,022
	P_3, P_2, P_1	0,254	0,098	-0,026	0,414	0,220	-0,022
Максимальная разница отклонений		0,099	0,042	0,036	0,015	0,028	-0,014
Рис. 1.9.18, б	P_1, P_2	0,2	0,160	-0,007	0,406	0,204	-0,018
	P_2, P_1	0,173	0,160	-0,018	0,410	0,214	-0,015
Максимальная разница отклонений		0,027	0	0,011	0,004	0,01	0,003

Таблица 1.9.5

Последовательность приложения сил зажима	Точка <i>M</i> (рис. 1.9.18)			Точка <i>N</i> (рис. 1.9.18)		
	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz
P_1, P_2, P_3	-0,168	-0,163	-0,084	-0,229	-0,162	0,029
P_1, P_3, P_2	-0,162	-0,167	-0,084	-0,219	-0,167	0,027
P_2, P_1, P_3	-0,2	-0,157	-0,073	-0,245	-0,156	0,034
P_2, P_3, P_1	-0,198	-0,171	-0,059	-0,246	-0,170	0,033
P_3, P_1, P_2	-0,172	-0,184	-0,070	-0,234	-0,183	0,028
P_3, P_2, P_1	-0,165	-0,185	-0,06	-0,226	-0,184	0,033
Максимальное отклонение	0,038	0,028	0,025	0,027	0,028	0,007

Шесть параметров погрешности установки характеризуют изменение положения заготовки в процессе ее установки. При этом в сравнении с размерными параметрами погрешности установки незначительное изменение угловых параметров может привести к значительным изменениям в положении отдельных точек заготовки, удаленных от начала ее координатной системы. В табл. 1.9.5 приведены значения перемещений двух точек заготовки с координатами *M* (100; 200; 100) и *N* (100; 0; 100) (см. рис. 1.9.18, в) при различных вариантах последовательного приложения сил зажима, равных $2 \cdot 10^3$ Н.

Из приведенного исследования влияния последовательности приложения силового замыкания на точность установки детали или сборочной единицы показало, что последовательное приложение сил зажима вызывает изменение положения заготовки, объясняемое нарушением схемы силового замыкания, которое возникает за счет появления сил трения в стыках заготовки с элементами приспособления.

Изменение последовательности приложения сил зажима может вызвать погрешность установки, соизмеримую с допуском.

Поэтому создание сил трения нужной величины в опорах позволяет регулировать влияние прикладываемых сил зажима на перемещение за-

готовки в направлении, высоких требований точности по условиям ее установки. Это возможно за счет выбора рациональной последовательности приложения сил зажима, их величин и коэффициентов трения. Это позволяет управлять погрешностями установки.

1.9.5. ВЫБОР МЕТОДА ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЗАМЫКАЮЩЕГО ЗВЕНА РАЗМЕРНОЙ ЦЕПИ

Решение задачи экономичного и производительного изготовления изделия тесно связано с назначением рациональных допусков на изготовление деталей и его сборку. Одним из методов определения рациональных допусков является расчет размерных цепей. При решении размерных цепей требуется из пяти методов достижения точности замыкающего звена выбрать наиболее эффективный.

Для выбора эффективного метода достижения точности часто приходится производить расчет допусков по нескольким методам, что значительно повышает трудоемкость расчета размерных цепей.

Задача расчета допусков на составляющие звенья при решении прямой задачи является задачей неопределенной, так как для расчета допусков на составляющие звенья, число которых равно $m - 1$, имеется только одно уравнение. Для упрощения таких расчетов разработан ряд способов, позволяющих определять допуски на составляющие звенья.

Воспользуемся способом расчета размерных цепей с использованием соотношения допусков на составляющие звенья. Как уже отмечалось в п. 1.3.2, смысл такого способа заключается в том, чтобы свести расчеты допусков на составляющие звенья к решению одного уравнения с одним неизвестным. С этой целью определяется допуск T_1 на одно из составляющих звеньев, а допуски на каждое из оставшихся составляющих звеньев определяются как произведение коэффициента сложности (в дальнейшем коэффициента точности B) данного звена на T_1 , т.е. $T_i = B_i T_1$.

Тогда уравнение для расчета допусков на составляющие звенья примет вид:

$$T_{\Delta} = B_1 T_1 + B_2 T_1 + \dots B_{m-1} T_1, \quad (1.9.11)$$

где B_i – коэффициент точности i -го составляющего звена, для $T_1 B = 1$.

Чтобы найти все значения B_i , необходимо выбрать составляющее звено, по отношению допуска которого будут определяться значения остальных допусков.

Предлагается для каждого составляющего звена коэффициент B определять как

$$B_i = T_i^3 / T_{\min}^3, \quad (1.9.12)$$

где T_i^3 – экономически достижимый допуск i -го звена; $T_{\min}^3$ – наименьшее значение экономически достижимого допуска составляющего звена в размерной цепи.

Отсюда для определения коэффициентов точности необходимо назначить экономически достижимые допуски на каждое составляющее звено. В связи с этим, для изготовления поверхностей, образующих размеры, которые входят в размерную цепь, выбирают способы обработки, ориентируясь на уровень требуемой точности согласно с $T_{\text{ср}}$:

$$T_{\text{ср}} = T_{\Delta} / (m - 1).$$

В соответствии с выбранным способом обработки назначают экономически целесообразный квалитет точности и значение экономически достижимого допуска.

Зная число составляющих звеньев, для i -го составляющего звена T_i^3 с помощью равенства (1.9.12) определяются значения B для всех составляющих звеньев. Тогда уравнение (1.9.11) при $B_1 = 1$ примет вид:

$$T_{\Delta} = T_{1\min}^3 + B_2 T_{1\min}^3 + \dots + B_{m-1} T_{1\min}^3. \quad (1.9.13)$$

Однако при выборе метода достижения точности замыкающего звена следует учитывать не только способы обработки, но и другие факторы. Например, применение метода групповой взаимозаменяемости ограничивается числом составляющих звеньев в размерной цепи; методы пригонки и регулировки требуют наличия в размерной цепи звена, которое можно использовать в качестве компенсатора и др.

Отсюда методика выбора эффективного метода достижения точности замыкающего звена заключается в последовательной оценке эффективности применения каждого из пяти методов (п. 1.3.2.1).

Последовательность рассмотрения методов определяется, прежде всего, уровнем простоты применения метода. По этому критерию сначала

рассматривается возможность применения методов полной и неполной взаимозаменяемости.

Последовательность рассмотрения применения других методов расчета определяется в зависимости от конкретных условий производства с учетом рекомендуемых областей применения этих методов.

Наиболее сложным с точки зрения применения является метод групповой взаимозаменяемости, что связано с необходимостью включения в производственный процесс сортировки, клеймения и организацию хранения деталей. Поэтому применение этого метода надо рассматривать только в условиях высоких требований к точности замыкающего звена.

При применении методов регулировки и пригонки, если нет звена, способного выступить в роли компенсатора, надо оценить затраты, связанные с изменением конструкции изделия из-за ввода в изделие нового звена – компенсатора.

Выбор экономического метода достижения точности замыкающего звена состоит в том, чтобы обеспечить $\sum T_i^3 \leq T_{\Delta}$.

Установив последовательность рассмотрения методов расчета, переходят к выбору одного из них. Сначала оценивается возможность применения метода полной взаимозаменяемости. Если окажется, что $\sum T_i^3 > T_{\Delta}$, то переходят к оценке возможности применения метода неполной взаимозаменяемости. Если и в этом случае $\sum T_i^3 > T_{\Delta}$, то переходят к оценке возможности применения, например, метода групповой взаимозаменяемости.

Метод групповой взаимозаменяемости целесообразен, если число звеньев m в размерной цепи не более некоторого допустимого значения M ($m \leq M$). Далее рассчитывают n' групп и сравнивают его с максимальным допустимым для данных условий числом групп H ($n' \leq H$).

Целесообразность использования метода пригонки определяется, во-первых, наличием в размерной цепи звена, которое можно использовать как компенсатор, во-вторых, величиной компенсации $T_{\text{ком}}$ которая должна быть не больше допустимой величины компенсации D_k ($T_{\text{ком}} \leq D_k$).

При анализе метода регулировки проверяют наличие в размерной цепи звена компенсатора, затем рассчитывается количество компенсаторов N' и сравнивается с допустимым числом N_d компенсаторов в размерной цепи. Метод целесообразен, если $N' \leq N_d$. Итак, выбор эффективного метода производится в том порядке, который указан выше; если преды-

душий метод оказывается неэффективным, то переходят к оценке следующего. После выбора метода достижения точности производят расчет по следующим формулам:

$$T_{\Delta}^{\Pi} = T_{\min}^3 \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| B_i; \quad (1.9.14)$$

$$T_{\Delta}^{\Pi} = t T_{\min}^3 \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i' B_i^2}; \quad (1.9.15)$$

$$n' = \frac{T'_{\Delta}}{T_{\Delta}}; \quad (1.9.16)$$

$$T_{\text{ком}} = T'_{\Delta} - T_{\Delta}; \quad (1.9.17)$$

$$N' = \frac{T_{\text{ком}}}{T_{\Delta-k}} + 1. \quad (1.9.18)$$

В формулах (1.9.14) – (1.9.18) используются следующие обозначения:

ξ_i – передаточное отношение i -го составляющего звена; T_{Δ} – сумма допусков составляющих звеньев, подсчитываемая по формуле метода полной взаимозаменяемости; λ_i' – коэффициент относительного рассеяния i -го составляющего звена; t – минимально допустимое значение коэффициента риска; T_k – значение допуска звена-компенсатора; T_{Δ}^{Π} , T_{Δ}^{Π} – допуски на замыкающие звенья, рассчитанные соответственно по методам полной и неполной взаимозаменяемости; T'_{Δ} – допуск, получаемый при расширенных допусках на составляющие звенья.

Используемые при расчете допустимые значения определяются на основе анализа условий производства, на котором предполагается изготовление рассматриваемого изделия (или сходного с ним), а также на основе анализа литературных данных.

После выявления целесообразного метода достижения точности расчет размерных цепей заключается в корректировке допусков составляющих звеньев по принятому методу, расчете координат середин полей допусков и предельных отклонений составляющих звеньев размерной цепи, расчете размеров компенсаторов по известным формулам.

Корректировка допусков обусловлена тем, что каждый метод достижения точности целесообразен в том случае, если некоторая рассчиты-

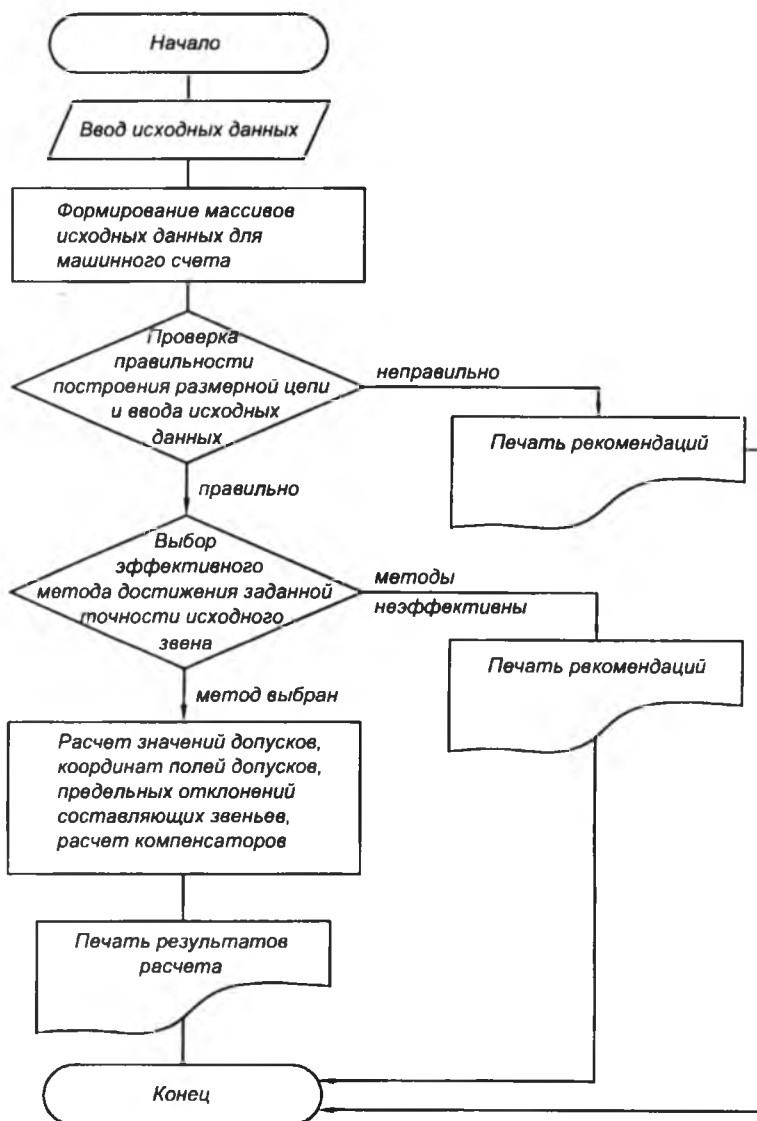


Рис. 1.9.19. Блок-схема расчета размерных цепей с выбором эффективного метода достижения заданной точки

ваемая величина (например, T_{Δ}^n , $T_{\Delta}^{n'}$, n' и т.д.) меньше заданной (T_{Δ} , H и т.д.) и, следовательно, есть возможность расширить экономически достижимые допуски с тем, чтобы приблизить рассчитываемые величины к заданным (допустимым).

С этой целью, исходя из (1.9.12), определяют значения минимального допуска $T_{\min}$, при котором выполняется условие равенства рассчитанных значений заданным.

В соответствии с приведенной методикой выбора эффективного метода достижения заданной точности замыкающего звена и расчета размерной цепи по выбранному методу приведен алгоритм решения прямой задачи на ЭВМ в виде блок-схемы (рис. 1.9.19).

Данный алгоритм позволяет рассчитывать плоские размерные цепи с параллельно расположенными звеньями и со звеньями, расположенными под углом к выбранному направлению исходного звена.

Исходными данными к расчету являются:

- 1) допуск исходного звена T_{Δ} ;
- 2) координата середины поля допуска исходного звена $\Delta_{0\Delta}$;
- 3) минимальный коэффициент риска t ;
- 4) коэффициент относительного рассеяния составляющих звеньев λ'_i ;
- 5) число звеньев в размерной цепи m ;
- 6) число увеличивающих звеньев в размерной цепи k ;
- 7) номер звена-компенсатора для метода пригонки k_1 ;
- 8) номер звена-компенсатора для метода регулировки k_2 ;
- 9) максимально допустимое количество групп селекции H ;
- 10) максимально допустимая величина снимаемого слоя с компенсатора $k_1 - D_k$;
- 11) максимально допустимое количество компенсаторов N_{Δ} ;
- 12) минимальный экономически достижимый допуск $T_{\min}^2$;
- 13) углы наклона составляющих звеньев к выбранному направлению замыкающего звена α_i ;
- 14) коэффициенты точности составляющих звеньев B_i ;
- 15) коэффициенты K_i составляющих звеньев:
 - + 1 – для увеличивающих звеньев,
 - 1 – для уменьшающих звеньев.

Для методов полной, неполной и групповой взаимозаменяемости расчет координат середин полей допусков и предельных отклонений является последним этапом в расчете размерной цепи, для методов же при-

гонки и регулировки – промежуточным этапом перед расчетом размеров компенсатора. Кроме того, для метода групповой взаимозаменяемости этот расчет осуществляется по каждой группе селективного отбора. В связи с этим при составлении программы по данному алгоритму вводят управляющие переменные, позволяющие при расчете переходить к соответствующим блокам алгоритма.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Преимущества метода математического моделирования в расчетах точности.
2. Последовательность выбора режима обработки, обеспечивающего заданную точность.
3. Каким образом изменение расположения опорных точек влияет на погрешность обработки?
4. Как при многоинструментной обработке нагрузка, возникающая на одном инструменте, вызывает погрешность обработки другим инструментом?
5. Каким образом последовательность силового замыкания влияет на погрешность обработки?
6. Методика выбора эффективного метода достижения заданной точности замыкающего звена.

Глава 1.10

ОСНОВЫ ДОСТИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПЕРЕХОДЕ

Существующие способы повышения точности изготовления изделий на технологической системе можно сгруппировать по следующим направлениям: повышение качества технологической системы; подавление действующих факторов; управление ходом технологического процесса.

При непрерывном росте требований к точности изготовления изделий использование только одного из перечисленных направлений в какой-то момент времени входит в противоречие с затратами на его осуществление. Этот момент будет обусловлен уровнями требований к точности изделий, развитием техники и технологии. Если, например, решать задачу достижения требуемой точности повышением качества технологической системы, то наступит момент, когда этот путь станет неэффективным вследствие возросших затрат на поиск новой конструкции, применения более качественных материалов, увеличения трудоемкости изготовления технологической системы. Аналогичная картина будет наблюдаться и при решении задачи точности по двум другим направлениям. Поэтому необходимо учитывать уровень развития науки и техники на момент разработки технологического процесса и выбирать более экономичное решение.

1.10.1. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Качество технологической системы является своеобразным барьером на пути действия факторов, стремящихся нарушить заданный ход технологического процесса. Отсюда главной задачей совершенствования технологической системы является повышение ее качественных характеристик и, в первую очередь, таких как жесткость, точность, износостойкость, теплостойкость, виброустойчивость. Эта задача в первую очередь решается конструктором на этапе проектирования технологической системы и должна рассматриваться в курсе расчета и конструирования технологического оборудования.

В данной главе рассматриваются методы повышения качества технологической системы, которые могут быть применены технологом и не затрагивающие пересмотра конструкции.

Повышение жесткости системы можно получить следующими технологическими методами: созданием предварительного натяга; со-

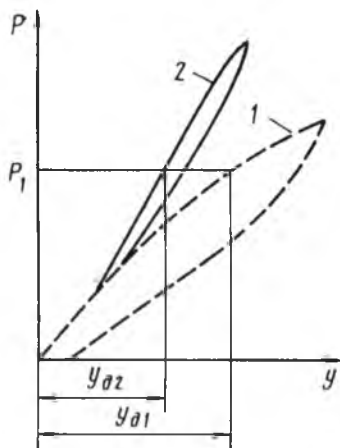


Рис. 1.10.1. Графики зависимости сила – перемещение детали узла:

1 – без предварительного натяга;
2 – после предварительного натяга

крашением числа стыков и звеньев в размерных и кинематических цепях; увеличением контактной жесткости; введением дополнительных опор.

Создание предварительного натяга позволяет выбрать зазоры в стыках, обеспечить большую определенность базирования деталей и тем самым увеличить жесткость технологической системы.

На графике рис. 1.10.1 показаны две кривые зависимости "сила – перемещение": кривая 1 дана без предварительного натяга в узле, кривая 2 – после создания предварительного натяга. Из графика видно, что в случае 2 относительное смещение детали y уменьшилось ($y_1 < y_2$) при одной и той же силе P . При этом уменьшается петля гистерезиса, что тоже повышает точность обработки.

Натяг создают с помощью пружин, гидравлических устройств, подвешивания грузов.

Сокращения числа стыков и звеньев в размерных цепях достигают посредством использования приспособлений. Например, размерная цепь горизонтально-расточного станка (рис. 1.10.2, а) содержит пять составляющих звеньев. Если для направления расточной борштанги, связанной со шпинделем двойным шарниром Гука, использовать кондукторные втулки, то число составляющих звеньев можно сократить (рис. 1.10.2, б) до двух.

Контактную жесткость стыков увеличивают с помощью специальных устройств в виде клиньев, прижимных планок. Для этих целей применяют также и смазочные материалы соответствующей вязкости. В неподвижных стыках контактная жесткость повышается посредством увеличения точности геометрических форм сопрягаемых поверхностей.

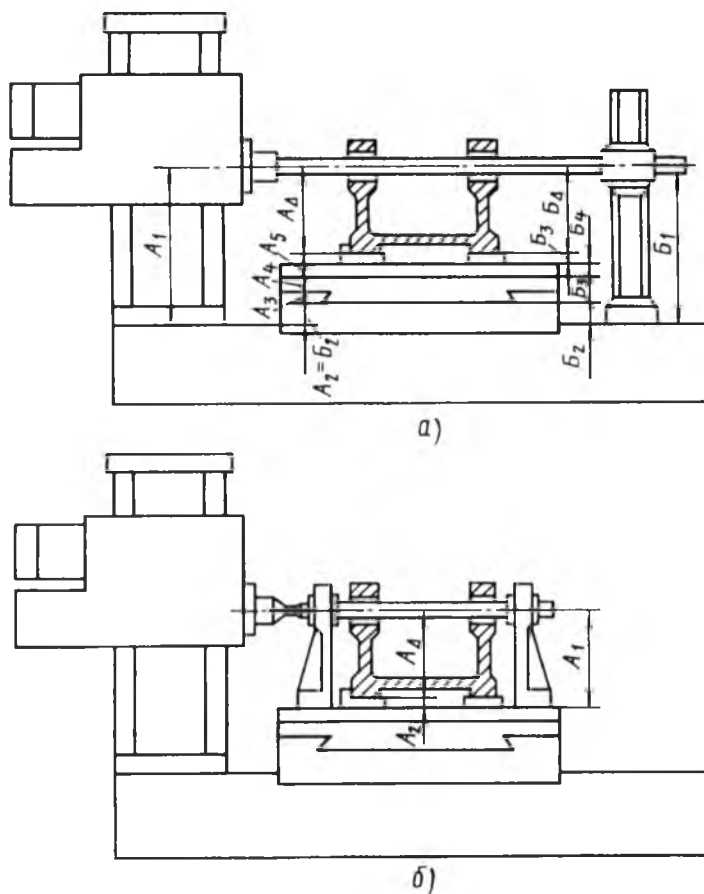


Рис. 1.10.2. Технологические размерные цепи при растачивании на горизонтально-расточном станке:

а – без применения кондукторных втулок;

б – с применением кондукторных втулок

Повышают жесткость и введением дополнительных опор, снижающих собственные упругие деформации деталей технологической системы. Особенно часто используют дополнительные опоры при обработке нежестких деталей, например, в виде подвижного (рис. 1.10.3, б) и неподвижного (рис. 1.10.3, а) люнетов, применяемых в качестве дополнительных опор

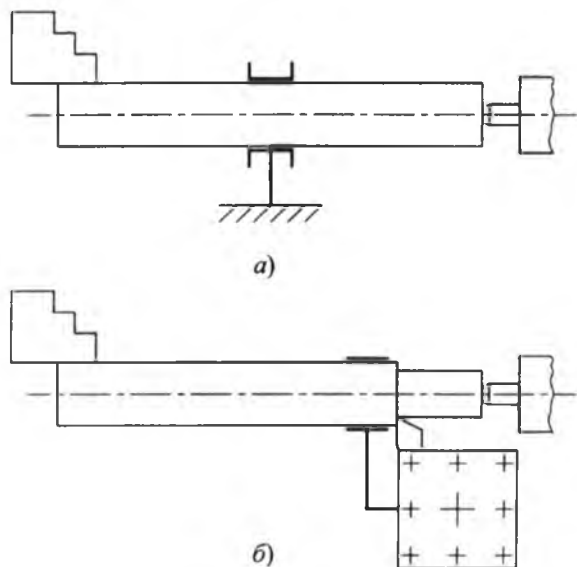


Рис. 1.10.3. Люнет:

а – неподвижный; б – подвижный

при обработке валов с соотношением длины к диаметру свыше 15. При применении неподвижного люнета сначала протачивают пояс, после чего вал устанавливают в опоры люнета. Для повышения жесткости деталей сложных конструктивных форм широко применяют подводимые опоры различных конструкций. Чтобы при дополнительных опорах не нарушалась схема базирования детали, она сначала должна быть установлена на основные шесть опор, затем к ней прикладывают силовое замыкание и только после этого подводят дополнительные опоры.

При сборке жесткость сборочной единицы можно увеличить, увеличивая жесткость базовой детали. Осуществляют это следующим образом: базовую деталь устанавливают на фундамент на три неподвижные опоры и подводят необходимое число дополнительных опор в виде регулировочных клиньев, домкратов и т.п. Другой способ повышения жесткости сборочной единицы заключается в обеспечении плотного прилегания контактируемых поверхностей соединяемых деталей.

Если точность сопрягаемых поверхностей деталей оказывается недостаточной для плотного прилегания, то приходится прибегать к шабре-

нию этих поверхностей. При шабрении используют шабровочные плиты, линейки или специальные приспособления. Сначала осуществляют пригонку поверхностей одной из соединяемых деталей, а затем – другой детали.

Процесс шабрения заключается в следующем. На шабровочную плиту наносят тонкий слой краски, затем плиту накладывают на исправляемую поверхность детали и после нескольких возвратно-поступательных движений снимают. По оставшимся пятнам и точкам судят о соответствии поверхности детали плите. Если пятна и точки расположены неравномерно, то форма поверхности недостаточно правильна. Тогда шабером снимают металл с тех мест, которые окрашены краской, и процесс повторяется. Считается, что для хорошего прилегания поверхностей сопрягаемых деталей необходимо иметь на квадрате размером 25×25 см от 10 до 30 пятен.

Для получения большей площади контакта после шабрения обеих контактируемых поверхностей проводят окончательное шабрение, используя одну из поверхностей как шабровочную плиту (обычно это поверхность большей протяженности, например, при шабрении направляющих станины за эталон принимают станину и шабрят корпус коробки).

Наиболее высокой точности достигают шабрением "по блеску", т.е. по блестящим пятнам, остающимся на поверхности детали после наложения и возвратно-поступательных движений плиты – эталон без накрашивания.

Повышение геометрической точности технологической системы технологическими методами осуществляется, главным образом, за счет повышения точности установки сменных элементов технологической системы. Достигается это за счет устранения неопределенности их базирования посредством создания баз, отвечающих правилам базирования и соблюдением правил приложения силового замыкания.

Например, если установочная и направляющая базы малы, то этот недостаток устраняют посредством искусственного увеличения этих баз. Так, при установке заготовки каретки револьверного станка торцом цилиндрической поверхности (малый диаметр) возникают значительные погрешности и большие упругие деформации при обработке консольной части (рис. 1.10.4, а). Увеличение размеров в результате создания дополнительной опоры (рис. 1.10.4, б) или прилива (рис. 1.10.4, в) позволяет существенно повысить точность установки и одновременно жесткость; после окончательной обработки детали прилив удаляют.

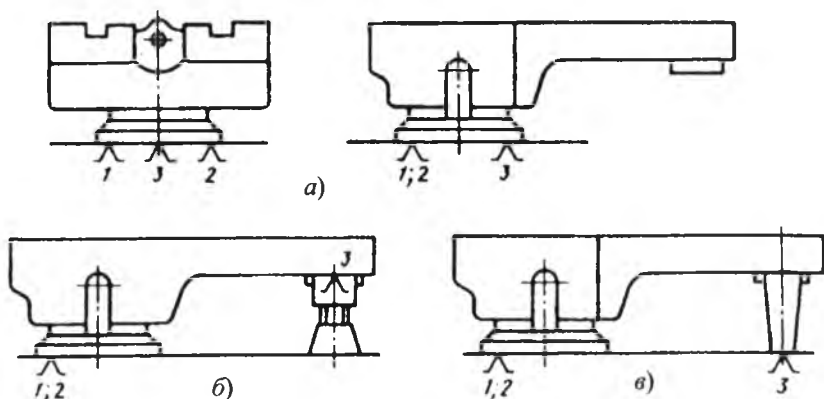


Рис. 1.10.4. Схемы базирования каретки револьверного станка:
а – по торцу цилиндрической поверхности; *б* – с помощью подводимой опоры;
в – с помощью прилива; 1, 2, 3 – опорные точки

При установке сменных элементов необходимо соблюдать правила приложения силового замыкания; сила зажима должна быть направлена на опору. В тех случаях, когда деталь достаточно жесткая, можно силу зажима прикладывать между опорами, но так, чтобы точка ее приложения находилась внутри треугольника, образованного тремя опорными точками, что предотвратит появление опрокидывающих моментов.

Базирование сменных элементов по двум штырям и плоскости или с использованием шпоночного паза при неправильном приложении силового замыкания порождает неопределенность базирования. Для устранения неопределенности базирования шпонки делают односторонними и меньшего размера по сравнению с шириной паза.

На финишных операциях, когда величина снимаемого припуска измеряется сотыми долями миллиметра, предъявляются высокие требования к точности установки заготовки. И в этих случаях особое внимание уделяется правильной последовательности приложения замыкания (см. п. 1.9.4.4).

Другим резервом повышения точности установки является правильное расположение опорных точек в пределах каждой базы. От расположения опорных точек (рис. 1.10.5) зависит схема нагружения сменного элемента, его упругие перемещения и, как результат, погрешность обработки (см. п. 1.9.2).

Повышение теплостойкости технологической системы достигается следующими мероприятиями:

- сокращением вылета режущего инструмента (чем меньше длина вылета режущего инструмента, тем меньше величина теплового удлинения при той же температуре нагрева);
- односторонним жестким закреплением длинных деталей, с тем, чтобы свободный конец детали мог перемещаться при удлинении из-за нагрева (например, при обработке длинного вала в центрах, задний центр делают подпружиненным и, когда вал начинает удлиняться, не происходит искажение его оси, вызывающее погрешность формы вала);
- применение материалов с малой величиной коэффициента теплового расширения (например, у высокоточных станков станины делают из гранита);
- построением такой конструкции технологической системы, чтобы при нагревании ее элементов происходила взаимная компенсация их тепловых деформаций.

Повышение износостойкости технологической системы осуществляют увеличением износостойкости сменных элементов технологической системы посредством использования высококачественного материала, в первую очередь для режущего инструмента, а также накладных направляющих, предварительным притуплением режущего инструмента, повышением виброустойчивости системы и качества изготовления режущего инструмента.

Накладные направляющие изготавливают из более износостойкого материала, при изнашивании их легко ремонтировать, а в случае необходимости – заменить на новые. Это особенно выгодно для станков крупносерийного и массового производства, характеризуемого высокой интенсивностью работы, когда в течение длительного времени происходит обработка большого числа деталей по одному чертежу. Например, при работе токарного станка суппорт совершает интенсивные движения на одном участке направляющих, поэтому в этом месте происходит их выработка, что приводит к погрешностям геометрической формы направляющих.

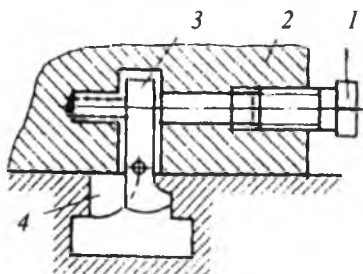


Рис. 1.10.5. Устройство для повышения точности установки

Притупление режущего инструмента путем доводки режущих кромок позволяет избежать работы инструмента на участке его интенсивного износа (см. рис. 1.6.24, период I) и использовать его на участке нормального износа (период II), характеризуемого линейной зависимостью.

Повышение виброустойчивости технологической системы достигается вследствие увеличения жесткости конструкций сменных элементов. Увеличение жесткости повышает частоту колебаний, что связано с уменьшением амплитуды колебаний.

Эффективным средством повышения виброустойчивости системы является также обеспечение определенности базирования сменных элементов. При существующей конструкции токарного станка при расточке отверстия (рис. 1.10.6, *а*) под действием составляющих силы резания $P_z P_y$ происходит раскрытие стыков в суппортной группе станка, что резко снижает виброустойчивость и порождает колебания в системе. Если правый конец расточной оправки жестко закрепить дополнительно с фартуком станка (рис. 1.10.6, *б*), то повышается определенность базирования, так как раскрытие стыков не происходит, что существенно увеличивает виброустойчивость системы. С таким закреплением оправки удается обрабатывать отверстия в 3 – 4 раза длиннее, чем с обычной оправкой.

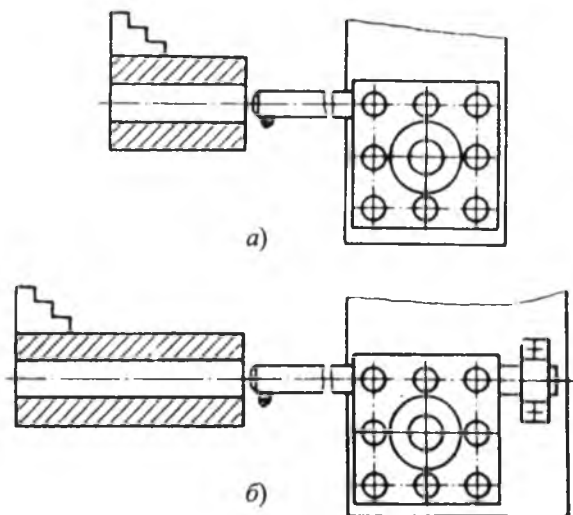


Рис. 1.10.6. Схемы наладки расточной операции на токарном станке:
а – традиционная; *б* – с дополнительным закреплением расточной оправки

Обработка на токарном станке перевернутым резцом также обеспечивает определенность базирования и тем самым повышает виброустойчивость технологической системы в результате выборки зазоров в стыках суппортной и шпиндельной групп станка. Момент от силы резания детали в одном направлении с моментом от силы тяжести увеличивают определенность базирования деталей шпиндельной группы.

1.10.2. ПОДАВЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Рассмотрим методы и средства повышения качества изготовления изделий при подавлении действующих факторов как на этапе изготовления деталей, так и на этапе сборки. Подавление действующих факторов осуществляется или воздействием на причины, вызывающие эти факторы, или непосредственным их сокращением.

Изготовление деталей. К методам подавления доминирующих факторов, вызывающих погрешности обработки деталей, относятся следующие.

Сокращение упругих перемещений. Упругие перемещения являются функцией действующих сил и жесткости технологической системы (способы повышения жесткости рассмотрены выше). Сокращение упругих перемещений возможно посредством воздействия на силы и их моменты, а именно на их величины, направления и расположение точек приложения.

Условно все силы, действующие в технологической системе, можно разделить на силы, обеспечивающие силовое замыкание, и силы, порождаемые процессом обработки. Воздействие на упругие перемещения возможно как уменьшением, так и управлением их величиной и направлением с целью взаимной компенсации.

Чтобы свести к минимуму вредное влияние упругих перемещений на погрешность установки сменных элементов технологической системы, необходимо соблюдать правила приложения силового замыкания.

Сила зажима должна быть направлена на опору. В тех случаях, когда деталь достаточно жесткая, можно силу зажима прикладывать между опорами, но так, чтобы точка ее приложения находилась внутри треугольника, образованного тремя опорными точками, что предотвратит появление опрокидывающих моментов.

На точность установки сменных элементов, как уже отмечалось, оказывает влияние последовательность приложения сил зажима; в зависимости от нее возникающие упругие перемещения в местах контакта элемента с базирующими поверхностями могут отрицательно или положительно влиять на погрешность установки.

В процессе обработки в технологической системе действуют силы резания, центробежные силы, образующие силовое поле, порождающее упругие перемещения элементов технологической системы. Первым способом уменьшения упругих перемещений является воздействие на силовое поле, образуемое совокупностью всех вышеперечисленных сил. Изменить силовое поле можно выбором способа наладки, подбором режимов обработки, при многоинструментной обработке – подбором расположения инструментов таким образом, чтобы происходила взаимная компенсация действующих сил.

Другой способ – уменьшение действующих сил, создание распределенной нагрузки вместо сосредоточенной. Уменьшение сил зажима ограничено тем обстоятельством, что положение заготовки в процессе обработки должно быть гарантировано.

Распределение нагрузки важно при зажиме нежестких деталей типа тонкостенного кольца в трехкулачковом патроне. Кулачки стараются выполнять по возможности большей ширины, тогда нагрузка распределяется по большей длине контакта и тем самым уменьшаются собственные упругие деформации кольца.

Снижение силы резания достигается уменьшением режимов резания и, в первую очередь, глубины резания и подачи, однако тогда происходят потери производительности. При уменьшении глубины резания увеличивается число проходов, а следовательно, растут затраты вспомогательного времени; при снижении подачи увеличивается основное технологическое время.

Колебание припуска в партии заготовок вызывает значительное колебание силы резания по величине и, как следствие, колебание упругого перемещения. Чтобы уменьшить эти колебания, заготовки предварительно сортируют на группы по припуску или по твердости материала заготовки. Тогда припуск или твердость заготовок для каждой группы будут колебаться в n раз меньше (здесь n – число групп).

Например, при обработке деталей типа крестовины погрешность угла между крестовинами при базировании по одной из осей цилиндрических поверхностей приводит к большой неравномерности припуска в процессе обработки другой цилиндрической поверхности. В этом случае задачу уменьшения неравномерности припуска решают следующим образом: сначала определяют погрешность угла между осями крестовины, затем базируют заготовку по оси одной крестовины, далее заготовку поворачивают в обратном направлении на $1/2$ погрешности угла. В результате погрешность окажется разделенной на две части и тем самым сократятся упругие перемещения.

Сокращение тепловых перемещений осуществляется посредством применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), предварительного разогрева технологической системы, а также повышения ритмичности работы оборудования, скорости резания, стабилизации температуры в помещении, выравнивания температуры в технологической системе.

Применение СОЖ, с одной стороны, улучшает условия резания, что способствует уменьшению выделяемой теплоты, с другой стороны, осуществляет отвод теплоты из зоны резания.

Предварительный разогрев технологической системы позволяет добиться теплового равновесия в системе и тем самым стабилизировать тепловые перемещения. Это особенно важно для шлифовальных станков, на которых, как правило, осуществляется финишная обработка. Разогрев происходит при работе станка на холостых ходах, форсированных режимах или при искусственном нагревании.

Повышение ритмичности работы оборудования существенно снижает колебание тепловых перемещений, что достигается правильной организацией работ, введением автоматизации, повышением надежности оборудования.

Увеличение скорости резания при обработке металлическим инструментом способствует тому, что большая часть теплоты отводится в стружку.

Температуру в технологической системе выравнивают, вынося из станка накопители теплоты в виде гидробаков, приводов, трубопроводов, а также применяя принудительный подогрев и охлаждение некоторых частей технологической системы.

Стабилизация температуры достигается использованием специальных помещений, обеспечивающих температурный режим $20 \pm 0,5$ °С. Как правило, в таких помещениях работает высокоточное оборудование, например, координатно-расточные станки, шлифовальные станки.

Сокращение уровня вибраций осуществляют, главным образом, уменьшением возбуждающих факторов и применением виброгасителей. Уровень центробежных сил снижают, повышая точность установки заготовки, проводя балансировку быстровращающихся частей технологической системы. Например, при установке на шлифовальный станок нового шлифовального круга его всегда балансируют.

Для снижения влияний вибрации от работающего рядом оборудования станки устанавливают на виброопоры. Подбирая режимы резания, в частности, скорости резания, удается избежать резонанса от совпадения частот возбуждающих сил и собственных колебаний системы.

Применение виброгасителей является одним из эффективных средств по борьбе с вибрациями. В этом случае вибрации гасят в результате поглощения энергии колебательного движения. Одни виброгасители построены на принципе поглощения энергии колебаний вследствие наличия сил трения, другие виброгасители – на создании колебаний в противофазе действующих колебаний в системе.

Сокращение износа элементов технологической системы достигается снижением режимов резания, уменьшением вибраций, стабилизацией действующих сил, применением СОЖ.

Сборка изделия. При сборке изделий нередко упругие деформации монтируемых деталей вызывают существенные погрешности их относительного положения и геометрической формы.

Воздействовать на упругие деформации можно правильным приложением силового замыкания, например, при креплении деталей винтами, болтами; последовательность закрепления винтов или гаек должна производиться в направлении от середины к краям. Сначала необходимо затягивать винты или гайки, расположенные на пересечении осей симметрии сопрягаемых деталей, затем ближайшие винты по осям симметрии, затем по диагоналям и т.д., для более удаленных винтов (см. рис. 1.6.34). Затягивать гайки следует постепенно: сначала на $1/3$ допустимого усилия затяжки, затем $2/3$ и окончательно. Для обеспечения постоянной силы затяжки необходимо пользоваться динамометрическими ключами, гайковертами.

Если деталь, обладающая небольшой жесткостью, значительно деформируется под действием массы монтируемых на нее других деталей, то применяют следующий метод. Перед тем как обрабатывать вспомогательные базирующие поверхности базовой детали, сначала рассчитывают или определяют экспериментально величину, направление и характер ее деформации. Затем при установке базовой детали для обработки на стол станка ее деформируют на ту же величину деформации, но в обратном направлении, с помощью домкрата или грузов, равных по массе деталям, которые должны быть смонтированы на базовой детали. После обработки и раскрепления базовой детали вспомогательные базирующие поверхности окажутся с заданной погрешностью формы. В процессе сборки, когда на эту деталь будут устанавливать все детали, она деформируется под действием их массы и вспомогательные базы примут правильную форму.

В качестве примера можно привести станину токарного станка. При строгании направляющих станины последнюю деформируют (рис. 1.10.7) с помощью болтов на требуемую величину и в этом состоянии строгают

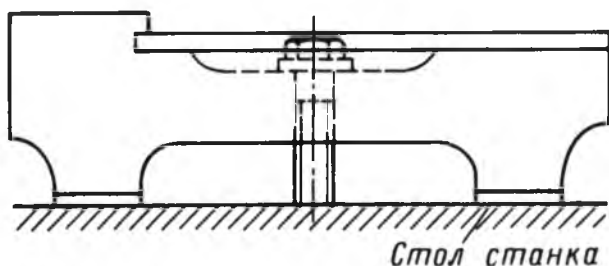


Рис. 1.10.7. Схема деформации станины для получения выпуклых направляющих после обработки

направляющие. После обработки направляющие станины становятся выпуклыми, а при установке фартука, каретки, суппортной группы станина деформируется и направляющие принимают прямолинейную форму.

На точность сборки изделия большое влияние оказывают геометрические погрешности деталей, поступающих на сборку. Уменьшить этот фактор возможно, применяя метод групповой взаимозаменяемости. Детали перед сборкой группируют на n групп и каждое изделие собирают из деталей, принадлежащих группе одного номера, внутри каждой из которых отклонения деталей в n раз меньше.

1.10.3. УПРАВЛЕНИЕ ХОДОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Управление ходом технологического процесса с целью достижения заданного качества изготовления изделия состоит из двух этапов: настройки технологической системы на заданный уровень качества и поднастройки ее во времени. Рассмотрим их на примере обработки деталей.

Процесс настройки технологической системы при обработке заготовок заключается в установлении требуемой точности относительного движения и положения технологических баз заготовки и режущих кромок инструмента. Постепенно, под влиянием многочисленных факторов, первоначальная точность настройки технологической системы теряется и ее приходится восстанавливать. Процесс восстановления первоначальной точности настройки технологической системы получил название *поднастройки*.

1.10.3.1. Настройка технологической системы

Прежде чем начинать настройку технологической системы, следует убедиться, что оборудование соответствует требованиям технологического процесса и отвечает требованиям геометрической точности. После этого производят монтаж приспособлений, служащих для установки и определения положения обрабатываемых заготовок и обрабатывающих инструментов.

При использовании различного рода универсальных подкладок, пластинок, упоров, угольников и т.д. задача сводится к правильному расположению их с последующим закреплением относительно координатных плоскостей станка, в качестве которых обычно используются рабочие плоскости и вертикальные стенки пазов стола станка. Эти же поверхности станка обычно используются и для установки и определения требуемого положения различного рода универсальных и специальных приспособлений.

Приспособление ставят на рабочую плоскость стола основной установочной базой, благодаря чему оно сразу и автоматически получает требуемую точность по трем координатам и лишается трех степеней свободы.

В качестве основной направляющей базы, которая должна обеспечить необходимую точность направления приспособления на столе и лишить его двух степеней свободы, обычно используются смонтированные в основании приспособления две шпонки, входящие в паз стола станка. В некоторых случаях вместо шпонок изготавливается цилиндрический "хвостик", входящий в надлежащее отверстие стола.

В обоих случаях задачу получения требуемой точности стараются решать методами полной взаимозаменяемости. Для этого ширину шпонки или диаметр "хвостовика" делают равными ширине паза стола или диаметру отверстия с посадкой, обеспечивающей надлежащее соединение.

Практика показывает, что ширина пазов и диаметры отверстий столов, как правило, значительно отличаются от расчетных как вследствие погрешностей изготовления, так, особенно, вследствие износа и последующих ремонтов.

Результатом является появление значительной по величине погрешности установки в одной из координатной плоскостей. Для уменьшения этой погрешности ширину шпонок следует делать меньше ширины паза стола (рис. 1.10.8, а); лучше делать шпонки односторонними (рис. 1.10.8, б). Обе эти особенности шпонок заставляют рабочего всегда прижимать приспособление к одной стенке паза стола, тем самым обеспечивая

определенность базирования и существенно сокращая погрешность установки и закрепления приспособления.

С целью создания возможности проверки точности установки приспособления как после закрепления, так и в процессе использования, целесообразно делать на приспособлении специальные поверхности. В качестве примера на рис. 1.10.9 показано приспособление, служащее для установки и закрепления зубчатых колес с базированием по торцу и с центрированием по делительной окружности для шлифования поверхности центрального отверстия.

На приспособлении сделаны две специальные кольцевые выточки *А*, расположенные с требуемой точностью относительно поверхностей, используемых для базирования устанавливаемой детали. Наличие таких выточек позволяет проверить в любой момент точность положения приспособления относительно оси вращения шпинделя и в случае необходимости сократить погрешность установки.

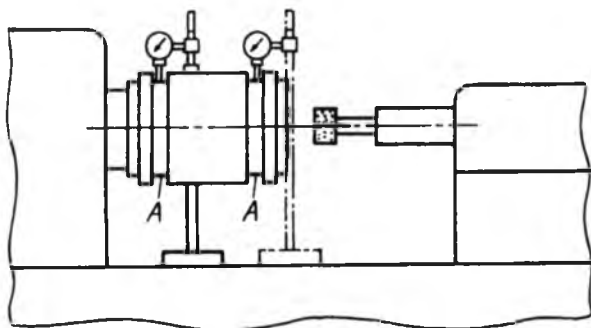
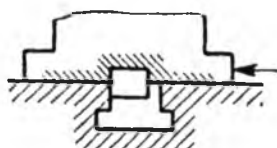
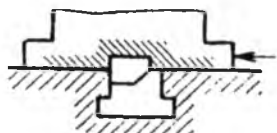


Рис. 1.10.9. Схема приспособления, снабженного выточками для контроля его положения



а)



б)

Рис. 1.10.8. Конструкции шпонок, обеспечивающие повышение точности установки приспособления:

а – двусторонняя шпонка;
б – односторонняя шпонка

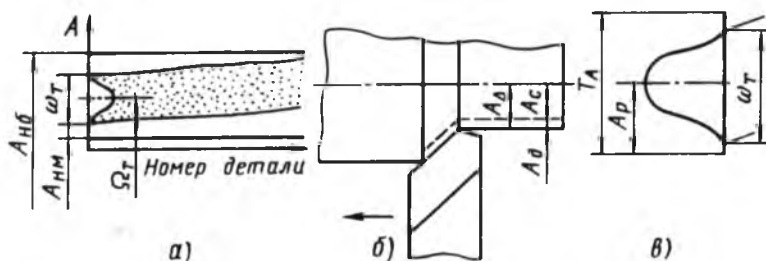


Рис. 1.10.10. Схемы:

- а – расположения точечной диаграммы рассеяния в поле допуска;
 б – получение размера детали A_d ; в – расположение A_p

Исследованию и особенно разработке новых конструкций приспособлений, полностью обеспечивающих высокую точность положения режущего инструмента относительно оси вращения шпинделя, до сих пор уделяется незаслуженно мало внимания. Между тем практика показывает, что в ряде случаев из-за погрешностей установки и закрепления инструмента нельзя экономично получить требуемую точность обрабатываемых деталей.

Выше указывалось, что в размерных цепях настройки технологической системы на точность расстояний между поверхностями и размеров поверхностей обрабатываемых заготовок используется метод регулировки. Для подведения и установки режущих кромок инструмента относительно выбранных координатных плоскостей используются различные устройства и приспособления, нередко встраиваемые в станки. После установки приспособления и режущего инструмента переходят к настройке технологической системы на заданную точность обработки.

Задача настройки заключается в получении годных деталей, т.е. получении качественных показателей детали в пределах заданных допуском. Для решения этой задачи необходимо, чтобы погрешность детали находилась в пределах допуска T .

Если речь идет об изготовлении партии деталей, то при настройке технологической системы необходимо правильно разместить возможное "мгновенное" поле рассеяния ω_T в пределах поля допуска (рис. 1.10.10, а), где Ω_T – координата середины поля рассеяния. Для этого, прежде всего, надо знать, как должно быть расположено ω_T : ближе к верхней границе допуска, ближе к нижней границе допуска или в середине поля допуска. Затем необходимо определить настроечный размер, после получения ко-

того при обработке первой детали можно быть уверенным, что ω_T займет нужное положение в поле допуска. При этом необходимым условием является неравенство $\omega_T < T$. Размер, к получению которого надо стремиться при настройке, получил название *рабочего настроечного размера* A_p .

Задача расположения ω_T в границах поля допуска объясняется действием систематических факторов. В результате их совокупного действия ω_T постепенно изменяет свое положение в поле допуска, приближаясь к верхней или нижней его границе.

Если совокупное действие систематических факторов известно, то известно, и к какой границе поля допуска будет приближаться ω_T . Тогда ω_T при настройке следует расположить около противоположной границы поля допуска T с тем, чтобы получить большее число годных деталей до первой поднастройки.

Сложность решения этой задачи заключается в том, что неизвестна величина ω_T и совокупное действие систематических факторов, изменяющих положение ω_T в границах поля допуска. Поэтому, чтобы осуществить настройку лучшим образом, надо как можно точнее знать величину ω_T и его смещение в границах поля допуска под совокупным действием систематических факторов.

При настройке следует различать размер статической настройки A_c , размер динамической настройки A_d и A_p .

При первоначальной настройке установка режущих кромок инструмента относительно базы, определяющей положение обрабатываемой детали, осуществляется на величину размера статической настройки A_c (см. рис. 1.10.10, б).

Следовательно, если в качестве размера статической настройки A_c принять рабочий настроечный размер A_p , т.е. $A_c = A_p$ и, осуществить настройку, то размер, полученный после обработки детали A_d не будет равен A_p вследствие появления размера динамической настройки A_d . Последний, как известно, возникает в первую очередь вследствие податливости технологической системы и необходим для создания натяга в технологической системе, без которого невозможна обработка (рис. 1.10.10, б).

Происходит это следующим образом. Приведем относительное упругое перемещение заготовки и резца к перемещению резца, упирающегося в пружину (см. рис. 1.6.4). Тогда в момент врезания резец начнет сжимать пружину до тех пор, пока сила ее сопротивления не станет равной силе сопротивления материалу заготовки, препятствующей съему с нее слоя материала.

С этого момента начнется процесс резания. Из схемы на рис. 1.10.10, б видно, что для получения намеченного рабочего настроечного размера A_p необходимо осуществить настройку на размер статической настройки, равный

$$A_c = A_p - A_d \quad \text{или} \quad A_c = A_p + A_{д_2}$$

в зависимости от направления упругого перемещения технологической системы или знака размера динамической настройки A_d .

Проблема настройки заключается в том, что рабочий или наладчик не знают значений размера A_d динамической настройки технологической системы и погрешности динамической настройки ω_d , так как на станках нет встроенных приборов, которые измеряли и устанавливали бы A_d и ω_d и их отклонения в процессе обработки одной партии деталей. Размер A_d является результатом не только упругого перемещения, но и ряда других факторов как систематических, так и случайных. Таким образом, единственным источником познания величин A_d и ω_d является опыт рабочего или наладчика. Основываясь на нем, производят настройку кинематических и размерных цепей технологической системы, затрачивая на это достаточно много времени, особенно в тех случаях, когда приходится осуществлять настройку нескольких размерных цепей при многоинструментной обработке.

Как правило, при обработке одной детали можно пренебречь совокупным действием систематических факторов из-за их незначительного влияния на погрешность обработки. Тогда, учитывая действие только случайных факторов, ω_d следует расположить посередине поля допуска (рис. 1.10.10, в). Но при обработке крупных деталей, например, при точении больших валов, даже на одной детали существенно проявляется действие систематических факторов и, в первую очередь, размерного износа резца. В таких случаях настройку технологической системы следует осуществлять как на обработку партии валов.

Настройка технологической системы на изготовление одной детали осуществляется при условии пренебрежения действиями систематических факторов.

С целью наилучшего использования поля допуска для компенсации возможных погрешностей ω_d , равновероятно расположенных в обе стороны от рабочего настроенного размера A_p , в качестве последнего берут среднее значение допустимых предельных размеров, т.е.

$$A_p = A_{cp} = \frac{A_{нб} - A_{нм}}{2}.$$

Предположим, что настройка ведется на токарном станке, у которого размер динамической настройки положителен. При настройке рабочий или наладчик определяет A'_d и ω_d приблизительно (на основании опыта) и, чтобы не получить бракованную деталь, прибегает к постоянному уточнению величины A'_d путем так называемых пробных проходов. Для этого вначале настройка ведется по размеру статической настройки (рис. 1.10.10, б):

$$A_c = \frac{A_p}{2} - A'_d,$$

где A_p – диаметральный рабочий настроенный размер.

После этого производится обработка небольшого участка детали и измеряется величина получаемого диаметрального размера A'_Δ , которая оказывается больше A_p на величину A_d , которой должна равняться поправка A'_{n1} , т.е.

$$\frac{A'_\Delta}{2} - \frac{A_p}{2} = A_d = A'_{n1}.$$

Не зная A_d , чтобы не получить размер, выходящий за пределы поля допуска A_Δ , рабочий вносит поправку в первоначальный размер статической настройки A_c'' на величину A'_{n1} , несколько меньшую A_{n1} для исключения погрешности в определении A_{n1} :

$$A_c'' = A_c - A'_{n1},$$

на которую и осуществляется изменение первоначальной настройки.

После этого производится обработка нового участка поверхности первоначального диаметра, измерение полученной величины нового размера A''_Δ и если $A''_\Delta \neq A_p$, то определяется новая величина A'_{n2} из равенства

$$\frac{A''_\Delta}{2} - \frac{A_p}{2} = A_{n2};$$

вносится новая A'_{n2} , несколько меньшая поправки A'_{n2} в A_c'' и т.д. Процесс повторяется до тех пор, пока после очередной обработки небольшого участка k не получается равенство $A_{\Delta k} = A_p$.

После получения этого равенства производят обработку на всю требуемую длину. Количество пробных проходов зависит от квалификации рабочего или наладчика, величины допусков и ряда других факторов. Описанный метод получил название "*метод пробных проходов*".

При настройке необходимо обрабатывать участок детали такой длины, чтобы его обработка производилась при установившемся процессе, так как иначе размер динамической настройки A_d будет другим, что внесет дополнительную погрешность в погрешность динамической настройки технологической системы. Это особенно сильно сказывается, например, при настройке размерных цепей фрезерных станков при обработке деталей торцовыми фрезами и т.д.

Настройка технологической системы на изготовление партии деталей. Особенностью этой настройки является необходимость так расположить будущее поле рассеяния ω_T внутри поля допуска T_A , чтобы оставить наибольшую возможную величину последнего для компенсации погрешностей, порождаемых систематически действующими факторами, изменяющимися по определенным законам. Это дает возможность обработать наибольшее количество деталей до первой поднастройки технологической системы, т.е. вести обработку наиболее производительно. Итак, чтобы осуществить настройку на обработку партии деталей, надо знать совокупное действие систематических факторов.

Для каждого вновь разрабатываемого или действующего технологического процесса может быть аналитически рассчитана и построена теоретическая диаграмма изменения любой характеристики качества изделия (рис. 1.10.11).

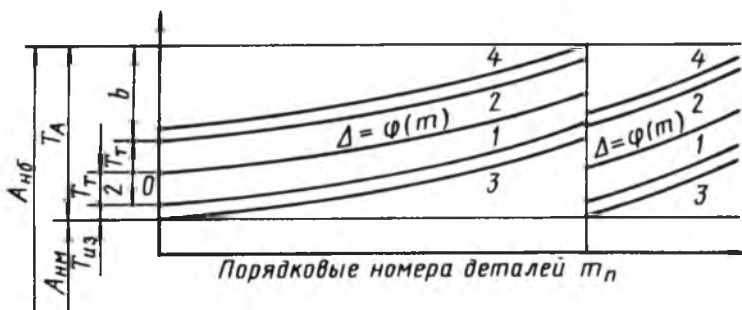


Рис. 1.10.11. Теоретическая диаграмма изменения размера в партии изготовленных деталей

Знание законов изменения систематически действующих факторов от времени, пути или количества обрабатываемых изделий дает возможность: 1) алгебраическим суммированием отклонений, порождаемых постоянными по величине систематическими факторами, определить величину и направление постоянной погрешности, порождаемые их совместным действием; 2) алгебраическим суммированием значений для ряда точек абсциссы найти погрешности, порождаемые совместным действием систематически действующих факторов, по известным законам изменения во времени, от пути или от количества отработанных изделий m . По полученным точкам можно построить кривую изменений их значений:

$$\Delta = \varphi(m).$$

Знание предельных погрешностей, порождаемых каждым из основных случайных факторов, дает возможность путем использования квадратичного суммирования определить возможную величину поля допуска T_T , предназначенного для их компенсации, так называемого "поля мгновенного рассеяния".

Используя перечисленные данные, можно построить теоретическую диаграмму изменения надлежащей характеристики качества изделия. В качестве примера на рис. 1.10.11 показано построение теоретической диаграммы изменения одного из охватываемых размеров детали.

В координатах размер детали – порядковые номера деталей m от условно выбранного начала отсчета (например, от наименьшего предельного размера $A_{\text{нм}}$) откладываются принимаемые величины постоянных погрешностей, например, погрешность измерения $T_{\text{из}}$. От этой точки откладывается половина расчетного поля допуска T_T , предназначенного для компенсации погрешностей, порождаемых совокупным действием случайных факторов при намеченном технологическом процессе.

Приняв полученную точку O за начало отсчета, строят кривую $\Delta = \varphi(m)$ изменения погрешности, порождаемой совместным действием всех систематически действующих факторов, изменяющихся по известным законам.

На расстояниях от полученной кривой, равных $T_T/2$, проводят две эквидистантные кривые 1 и 2 (рис. 1.10.11), ограничивающие расчетное поле допуска T_T . На расстояниях от кривых 1 и 2, равных допуску на погрешность измерения $T_{\text{изм}}$, проводят две эквидистантные кривые 3 и 4, ограничивающие поля погрешностей измерения. Построенная таким образом теоретическая диаграмма показывает пределы возможных измене-

ний размера деталей по мере их обработки в пределах поля допуска T_A , установленного на данную характеристику качества (например, на размер).

Аналогичным способом можно построить теоретические диаграммы и для других характеристик качества детали. Теоретические диаграммы позволяют предвидеть ход технологического процесса и организовать управление им для обеспечения требуемого качества деталей.

В точке, где кривая 3 пересекает верхнюю границу поля допуска, в технологический процесс необходимо внести поправку, так как продолжение процесса начнет порождать выход размеров деталей за верхнюю границу поля допуска. Внесение поправки заключается в том, чтобы все эквидистантные кривые сместить к нижней границе поля допуска.

Из теоретической диаграммы точности (см. рис. 1.10.11) видно, что для получения требуемой точности T_A размера партии деталей, необходимо в качестве рабочего настроечного размера использовать размер, связывающий середину поля установленного допуска, предназначенного для компенсации погрешности, порождаемой совокупным действием случайных факторов T_T с началом отсчета размеров, если при установлении допуска T_T принят закон нормального рассеяния случайных погрешностей (при этом центр группирования совпадает с серединой поля допуска). Предположим, что для этих условий

$$A_p = A_{\text{нм}} + \alpha + 3\sigma_T, \quad (1.10.1)$$

где $A_{\text{нм}}$ – номинальный размер; α – часть поля допуска, предназначенная для компенсации погрешностей постоянных систематически действующих факторов (на рис. 1.10.11 – $T_{\text{из}}$); $T_T/2 = 3\sigma_T$ – половина расчетной величины поля допуска, предназначенного для компенсации будущих погрешностей, порождаемых совокупным действием случайных факторов.

Предположим далее, что, используя метод пробных проходов, технологическую систему настроили по рабочему настроечному размеру, подсчитанному по равенству (1.10.1). Если после этого при неизменной настройке обработать партию деталей, то с равной вероятностью может оказаться, что возможное поле рассеяния ω_T расположится либо вниз (рис. 1.10.12, а), либо вверх (рис. 1.10.12, б) от конца принятого рабочего настроечного размера A_p , либо в промежуточном положении. В первом случае, в результате обработки часть обработанных деталей – до порядкового номера k – может выйти за нижнюю границу поля допуска и попасть в неисправимый брак; во втором – все детали окажутся годными, однако количество деталей, обработанных до первой поднастройки, сократится.

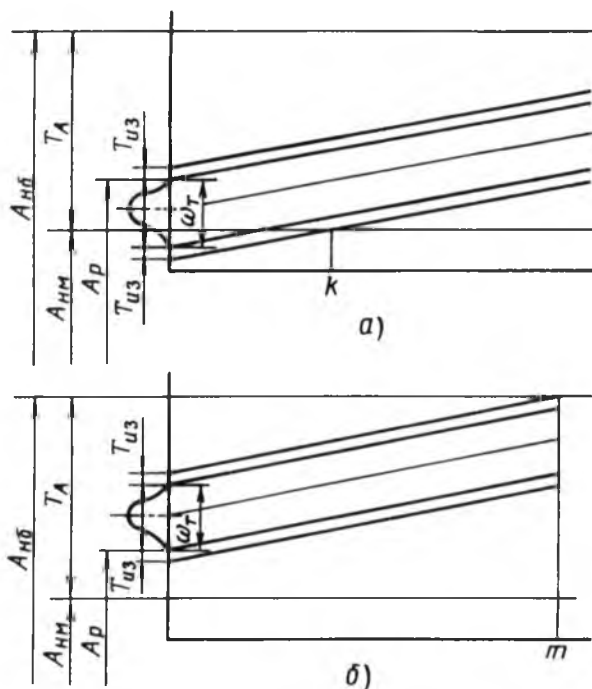


Рис. 1.10.12. Возможное расположение поля мгновенного рассеяния относительного размера A_p :

a – нижнее расположение ω_T ; $б$ – верхнее расположение ω_T

Следовательно, по одной пробной детали нельзя знать о возможном расположении выбранного при настройке поля допуска T_T относительно рабочего настроечного размера, а значит нельзя судить и о правильности сделанной настройки. Эта возможность появляется с той или иной степенью приближения к действительности, если вместо одной пробной детали обработать группу деталей при неизменной настройке. Тогда по величине и направлению отклонения среднего группового размера $A_{гр.ср}$ от рабочего настроечного размера можно с некоторой степенью приближения судить о правильности сделанной настройки.

Чтобы еще повысить точность настройки, когда обрабатываются большие партии, обрабатывают несколько групп деталей и настройку ведут с учетом среднего размера группы в каждой партии.

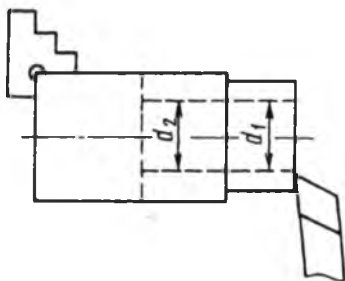


Рис. 1.10.13. Настройка технологической системы с помощью ступенчатой детали

В ряде случаев при настройке технологической системы на партию деталей можно воспользоваться следующим методом определения ω_7 . Предварительно изготавливают специальную двухступенчатую заготовку, у которой размер ступени соответствует ожидаемой разнице максимального и минимального припуска заготовки в партии (рис. 1.10.13). Эту заготовку обрабатывают за проход с одной и той же подачей, скоростью резания при одном размере статической настройки. Разница в раз-

мерах двух ступеней после обработки будет приблизительно соответствовать значению ω_7 в партии заготовок. Степень приближения оценки будет зависеть от влияния других неучтенных факторов, таких, как изменение твердости в партии заготовок, затупление режущего инструмента и др.

При обработке одной заготовки одновременно несколькими инструментами настройка технологической системы резко усложняется, значительно повышается трудоемкость настройки. В этом случае целесообразно для упрощения настройки использовать ранее обработанную деталь или специально изготовленный эталон.

При настройке по ранее обработанной детали последнюю с возможно большей точностью устанавливают на станке или другом виде оборудования. Все инструменты доводят рабочими кромками до соответствующих поверхностей детали, ограничивающих рабочее движение каждого из инструментов. В таком положении инструменты закрепляются в державках или рабочих органах оборудования.

Если работа технологической системы ведется по упорам, производятся установка и регулировка всех упоров, служащих для выключения механической подачи и т.д. После этого эталонную деталь снимают, устанавливают заготовку и производят ее обработку и измерение.

Инструменты, не обеспечивающие получение требуемой точности на соответствующих размерах обработанной детали, подвергаются дополнительной регулировке. После этого изготавливается вторая пробная деталь и процесс повторяется до тех пор, пока по всем размерам детали

не будет получена требуемая точность. Другими словами, эталонная деталь дает всегда возможность произвести только статическую настройку технологической системы, в которую всегда приходится вносить поправки, вызываемые динамической настройкой.

Специальные эталоны в ряде случаев точно воспроизводят обрабатываемую деталь, изготовленную ближе к верхнему или нижнему предельному размеру, в зависимости от направления действия систематических погрешностей.

Когда известны точностные характеристики технологической системы, на которой предполагается вести обработку деталей, эталоны делаются с размерами, измененными на размер динамической настройки. При настройке между рабочей кромкой инструмента и поверхностью эталона в таких случаях вставляется шуп расчетной толщины. Такого рода эталоны в сочетании со щупами могут использоваться при обработке деталей на разных технологических системах. Изменением толщины щупов компенсируется разница в величине надлежащих размеров динамической настройки разных технологических систем. Опыт показывает, что настройка по эталонам при высоких требованиях к точности обрабатываемых деталей обычно требует внесения корректировки с использованием "метода пробных проходов", а иногда пробных деталей.

При обработке деталей сложного профиля, больших габаритных размеров и большой массы использование ранее обработанных деталей в качестве эталонов для статической настройки становится громоздким и неэкономичным. В таких случаях их заменяют специально изготавливаемыми деталями, так называемыми габаритами. Габарит обычно представляет собой уменьшенный на толщину щупа профиль подлежащих обработке поверхностей детали, выполненный в виде отливки небольшой ширины или сварной конструкции. С целью сохранения точности габарита его рабочие поверхности делают из стальных закаленных накладных пластин. Габарит иногда делают одновременно с обработкой первой детали, чтобы использовать его для настройки технологической системы при обработке всех последующих деталей.

Для деталей простых конструктивных форм вместо габаритов иногда используют плоскопараллельные концевые меры длины (плитки), устанавливаемые на специально сделанные для этого площадки приспособлений (рис. 1.10.14).

При установке режущих инструментов по габаритам в обычных условиях отсутствует возможность видеть по какому-либо отсчетному устройству точность статической настройки. Поэтому точность настройки в основном зависит от квалификации рабочего и не превышает 0,03...0,05 мм.



Рис. 1.10.14. Использование концевых мер для статической настройки

Для устранения этого недостатка в конструкции ряда станков встраиваются различного рода измерительные устройства, например, в виде линейек с нониусами, встроенные в станок; для увеличения точности отсчета около нониусов устанавливают увеличительные стекла. С этой же целью на некоторых станках встраиваются индикаторы. Точность статической настройки может быть повышена до 1 мкм посредством применения многооборотного микрометра с ценой деления 0,001 мм.

Встроенные индикаторы в сочетании с концевыми мерами длины позволяют реализовать основные преимущества координатного способа получения требуемых расстояний между поверхностями детали путем использования в качестве одной из технологических баз плоскости, проводимой параллельно плоскости стола станка касательно к наконечнику индикатора при нулевом показании его стрелки. Как и при всякой смене баз, новая технологическая база связывается с прежней базой размером, ограниченным допуском. Все размеры, которые необходимо получить на детали в результате обработки, пересчитываются и проставляются от новой технологической базы.

При повышении точности статической настройки размерных цепей технологической системы наряду с механическими устройствами в ряде случаев используются оптико-механические, оптические, электрические и электромеханические устройства. В частности, в координатно-расточных станках применение таких устройств позволяет повысить точность статической настройки до 0,002 мм.

1.10.3.2. Поднастройка технологической системы

Под влиянием многочисленных факторов первоначальная точность настройки технологической системы теряется и размер детали начинает приближаться к одной из границ поля допуска. Если не предпринять каких-либо мер, размер очередной детали может выйти за границу поля допуска и деталь окажется бракованной. Чтобы избежать брака, технологическую систему необходимо периодически или непрерывно поднастраивать, т.е. управлять настройкой технологической системы.

Сущность процесса управления настройкой заключается в получении информации об управляемой величине, переработке полученной информации и внесении соответствующих коррективов в ход технологического процесса.

Все *методы управления* точностью обработки можно сгруппировать по информационному признаку на *три группы*:

- 1) управление по результатам предварительного измерения (по входным данным);
- 2) управление по результатам текущих измерений в процессе работы технологической системы;
- 3) управление по результатам обработки (по выходным данным).

Процесс управления точностью может осуществляться вручную, когда оператор измеряет погрешность обработки и вносит посредством тех или иных механизмов поправку, и автоматически – с помощью систем автоматического управления.

В последнее время автоматические системы управления все более широко применяются, поэтому будем рассматривать вопросы управления с помощью автоматических систем.

Управление по входным данным. Методы управления точностью обработки по входным данным основаны на предварительном определении состояния технологической системы, характеристик-заготовок, поступающих на обработку, вычислении на основе полученной информации ожидаемой погрешности и внесения соответствующей поправки в относительное положение или движение заготовки и обрабатывающего инструмента.

Главным преимуществом методов управления этой группы является возможность внесения поправки без запаздывания, поскольку процесс управления осуществляется до начала работы. Другим преимуществом является сравнительная простота в получении информации, так как технологическая система в это время не работает, и доступ к ней не затруднен.

Однако при этом необходимо знать механизм образования погрешностей и его математическое описание, чтобы рассчитывать с высокой точностью поправку, которую надо внести для устранения ожидаемой погрешности. И здесь возникают значительные сложности из-за отсутствия адекватных математических моделей. С другой стороны, надо также учесть влияние и тех факторов, которые будут действовать во время работы.

На практике методами управления первой группы удастся компенсировать систематическую составляющую погрешность постоянной величины практически без учета динамики (за редким исключением), т.е. без учета той части погрешности, которая возникает в процессе обработки. К компенсируемым погрешностям относятся, например, систематические погрешности кинематических цепей и погрешность относительного положения рабочих поверхностей в статике.

В осуществлении методов управления первой группы нашли достаточно широкое распространение различного рода коррекционные устройства для компенсации систематических погрешностей. Рассмотрим устройства такого рода в случае резбошлифовального станка. Кинематика станка должна обеспечивать высокую точность относительного винтового движения шлифовального круга и заготовки, так как эти станки предназначены для шлифования высокоточных резьб. Однако в силу неточности изготовления деталей, выполняющих роль кинематических звеньев и, в первую очередь, в результате ошибок в шаге ходового винта станка закон относительного движения нарушается. И эта погрешность имеет систематическую составляющую в виде накопленной ошибки шага. В задачу коррекционного устройства входит компенсировать эту погрешность.

На рис. 1.10.15 показан в качестве примера резбошлифовальный станок с системой коррекции. В процессе резбошлифования кругом шток 2 механизма коррекции скользит по профилю коррекционной линейки 1 и в зависимости от его изменения получает дополнительные перемещения в направлении, перпендикулярном ходовому винту. Посредством кинематической связи эти дополнительные перемещения штока сообщают гайке 3 дополнительные повороты относительно ходового винта 4 станка. В результате изменяется скорость поступательного перемещения стола станка вместе с обрабатываемой заготовкой 5.

С помощью системы коррекции сокращается систематическая составляющая погрешности, обусловленная главным образом неточностью рабачей пары винт-гайка. При этом остаются некомпенсированными погрешности шага, вызванные изнашиванием шлифовального круга, тепловыми и упругими перемещениями элементов технологической системы.

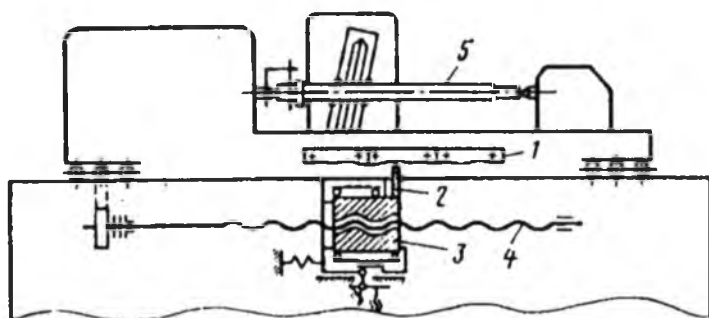


Рис. 1.10.15. Схема резьбошлифовального станка с системой коррекции

В зависимости от требуемой точности перемещения рабочего органа той или иной машины, механизма, ходовые винты делятся на пять классов точности. Одним из наиболее важных параметров точности ходового винта является точность шага резьбы. Чем выше класс точности ходового винта, тем сложнее технология и выше трудоемкость его изготовления. Так, например, на изготовление закаленного ходового винта первого класса точности длиной в 950 мм затрачивается 7...10 ч. При этом время изготовления резьбы составляет около 50 % общих затрат времени.

Высокая точность резьбы ходовых винтов обеспечивается за счет введения чистовой и отделочной операций, осуществляемых на прецизионных станках, оснащенных различного рода системами коррекции.

Применение таких систем коррекции наиболее эффективно, когда доминирует систематическая составляющая погрешности, поэтому возникает задача выделения этой погрешности из суммарной.

Определение систематической составляющей осуществляется следующим образом. Вначале обрабатывается резьба ходового винта одного из партии винтов, подлежащих изготовлению на данной операции. По результатам измерения погрешности шага резьбы этого винта определяется накопленная погрешность шага, и после этого изготавливается коррекционная линейка с соответствующим профилем. Однако прежде чем изготовить коррекционную линейку, определяют систематическую ошибку шага.

Винт, обработанный в условиях, в которых предполагается изготовлять всю партию ходовых винтов, устанавливается в измерительную машину и подвергается тщательному контролю. С высокой точностью измеряется шаг по длине винта в одной из случайно выбранных плоскостей

продольного сечения шага по правой и левой стороне профиля резьбы. По данным измерений рассчитываются среднеарифметические значения погрешности шага и по ним строится график погрешности шага по длине винта. Профиль коррекционной линейки определяют как зеркальное изображение измеренной погрешности шага.

Если измерение шага провести в другой плоскости продольного сечения винта, то в силу наличия циклической ошибки шага график изменения шага по длине винта будет другим. Для подтверждения изложенного выше предположения был поставлен следующий эксперимент. У десяти ходовых винтов первого класса точности с шагом в шесть ниток на дюйм были проведены измерения погрешности шага в плоскостях трех продольных сечений I – III (рис. 1.10.16).

Как следует из рис. 1.10.16, *а*, погрешности в сечениях I и II существенно отличаются друг от друга. Если теперь сопоставить графики погрешностей у десяти винтов в одном и том же фиксированном продольном сечении, то эти графики тоже будут отличаться друг от друга из-за наличия случайной составляющей погрешности. Таким образом, от того, в каком сечении будет измеряться погрешность шага у обработанного ходового винта, зависит характер внесения поправки и степень повышения точности. При этом часть погрешности окажется некомпенсированной, причем в зависимости от углового положения сечения оставшаяся погрешность будет разной.

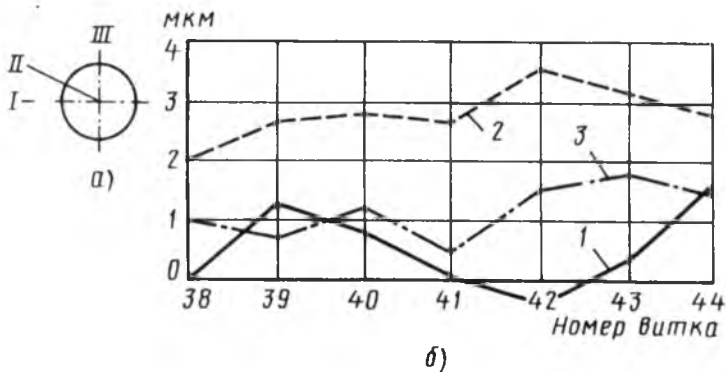


Рис. 1.10.16. Погрешность шага ходового винта в разных продольных сечениях:

а – угловое расположение сечений; *б* – погрешность шага по длине резьбы (кривая 1 – сечение I; кривая 2 – сечение II; кривая 3 – сечение III)

Другим недостатком рассматриваемого способа коррекции является сохранение влияния на погрешность шага систематических факторов, изменяющихся во времени, и случайных факторов. К первым, прежде всего, относятся тепловые погрешности элементов технологической системы, а также изнашивание шлифовального круга. Для компенсации этих факторов необходимо периодически или непрерывно вносить поправку в настройку технологической системы. Тепловые деформации технологической системы компенсируют коррекционной линейкой, устанавливаемой с наклоном. В других случаях ее делают сборной, состоящей из нескольких секций. Перемещая их друг относительно друга, можно частично компенсировать нелинейность погрешности шага, однако и в этом случае удастся сократить лишь часть погрешности от тепловых деформаций, так как эту составляющую сложно определить с требуемой точностью в связи с тем, что она изменяется от детали к детали; кроме того, в случае значительного перерыва в работе технологическая система остывает, и тепловые деформации существенно изменяются. Этот фактор может оказывать существенное влияние на точность обработки, так как даже при обработке партии ходовых винтов из десяти штук их обработка будет длиться несколько смен. Поэтому после перерывов в работе, а также в начале смены станок необходимо предварительно разогревать, что снижает производительность обработки.

На точность шага нарезаемой резьбы с системой коррекции существенное влияние оказывают также и случайные факторы, и в первую очередь колебание припуска. Вот почему системы коррекций не всегда позволяют обеспечивать требуемую точность.

Управление по выходным данным. Компенсация погрешности обработки таким методом (получил название метода активного контроля) осуществляется, как правило, периодически в момент, когда погрешность размера приближается к границе поля допуска. Преимущества заключаются в простоте определения поправки, которую необходимо внести для компенсации погрешности обработки, а недостаток — запаздывание в получении информации, так как измеряют погрешность обработки после того как вся деталь или ее часть обработана.

Активный контроль нашел сравнительно широкое распространение. Его функции сводятся, главным образом, к компенсации погрешности, обусловленной совокупным действием систематических факторов как постоянных по величине, так и изменяющихся во времени. К таким факторам в первую очередь относятся геометрические погрешности и изнашивание.

В станкостроении наиболее распространен активный контроль в шлифовальных станках. При обработке на этих станках изнашивание шлифовального круга доминирует среди других погрешностей и отличается большой скоростью изменения.

На рис. 1.10.17 приведена система активного контроля. В процессе обработки партии деталей каждая деталь после схода со станка подвергается измерению скобой (рис. 1.10.17, а). Измеренная величина в виде электрического сигнала поступает на сравнивающее устройство, где она сопоставляется с заданным значением. Если между этими величинами имеется разница, то на этой основе формируется величина управляющего сигнала, поступающего на исполнительный механизм (подналадчик), вносящий поправку в относительное положение рабочих поверхностей, в данном случае – в относительное положение режущих кромок инструмента и технологических баз заготовки.

Еще одно преимущество методов управления этой группы заключается в измерении точности в статическом состоянии, когда деталь измеряется вне станка. Однако, как уже отмечалось, это преимущество влечет за собой и недостаток в виде увеличения запаздывания во внесении поправки, а это отражается отрицательно на повышении точности этим путем.

При использовании систем активного контроля приходится решать такие задачи, как уменьшение величины запаздывания в управлении точностью и выделение систематической составляющей из суммарной погрешности.

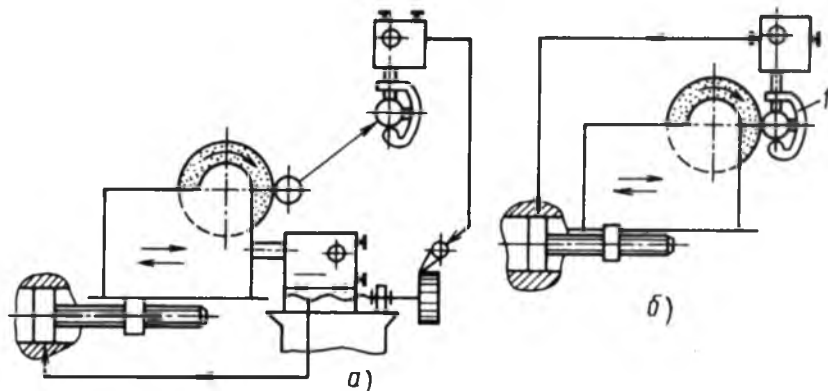


Рис. 1.10.17. Система активного контроля:

а – контроль детали после обработки; *б* – контроль детали на станке

С целью сокращения запаздывания стали создавать системы активного контроля, где измеритель I , контролирующий обработанную деталь, располагается следом за режущим инструментом (рис. 1.10.17, б). При таком измерении существенно уменьшается величина запаздывания, но при этом появляются дополнительные трудности с измерением детали. Измерение осуществляется на станке в условиях съема стружки, подачи СОЖ, вибраций станка и т.п.

Чтобы определить момент внесения поправки, применяют 100 %-ный или выборочный контроль и строят точечные диаграммы (рис. 1.10.18, а).

Сложность управления по данным точечной диаграммы заключается в том, что действие случайных факторов затрудняет определение погрешности, обусловленной систематическими факторами, и не позволяет точно прогнозировать погрешность следующей детали. Чтобы выявить влияние на погрешность обработки совокупного действия систематических факторов, строят точечную диаграмму групповых средних размеров.

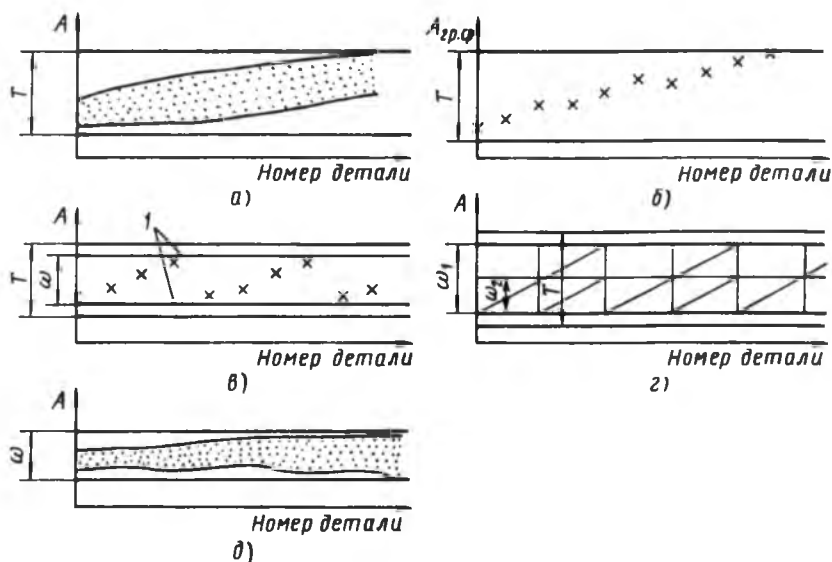


Рис. 1.10.18. Точечные диаграммы:

- а – размеров обработанных деталей в партии; б – групповых средних размеров в партии обработанных деталей; в – при поднастройке по групповым средним размерам; г – при разной частоте поднастроек; д – при поднастройке малыми импульсами

Например, определяют средний размер у первых пяти деталей, потом у следующих пяти деталей и т.д. (рис. 1.10.18, б). Такие точечные диаграммы позволяют выявить систематическое изменение погрешности обработки.

Однако при приближении группового среднего размера к границе поля допуска может оказаться, что размер одной детали из группы под влиянием случайных факторов выйдет за границу поля допуска. Чтобы этого избежать, на точечной диаграмме проводят контрольные границы (рис. 1.10.18, в). Как только групповой средний размер приблизится к контрольной границе, в технологической системе осуществляют поднастройку изменением размера статической настройки. Чем чаще проводят поднастройку, тем с большей точностью можно вести обработку (рис. 1.10.18, г). Из рис. 1.10.18, г видно, что ω_2 становится в 2 раза меньше ω_1 при повышении частоты поднастройки в 2 раза.

Поднастройка по каждой детали получила название поднастройки малыми импульсами (рис. 1.10.18, д). Установлено, что при поднастройке по каждой детали погрешность обработки не уменьшается до нуля, а, наоборот, иногда даже увеличивается. Объясняется это действием случайных факторов.

Пусть на вертикально-фрезерном станке обрабатывается партия деталей. Поступающие на обработку заготовки имеют различные размеры, вследствие чего меняется величина припуска на каждой заготовке (рис. 1.10.19). Когда будет обработана первая заготовка, с максимальным припуском $Z_{\max}$, деталь получится с наибольшей погрешностью $A_{\max}$. В соответствии с этим система активного контроля осуществит поднастройку станка на фрезерование следующей заготовки в сторону уменьшения размера на величину $A_{\max}$. Однако второй заготовкой случайно оказалась заготовка с минимальным припуском $Z_{\min}$, когда и без поднастройки погрешность ее обработки $A_{\min}$ будет минимальной. Но с учетом внесенной поправки погрешность обработки второй детали вместо того, чтобы уменьшиться, окажется увеличенной и может выйти за пределы допуска.

Попытки сокращения погрешности от случайных факторов применением систем активного контроля, оснащенных вычислительными устройствами, с помощью которых импульс поднастройки определяли вероятностными методами, не дали практически ощутимых результатов, а лишь существенно усложнили системы активного контроля и их эксплуатацию.

С целью устранения указанных недостатков необходимо свести к минимуму погрешность обработки, обусловленную действием случайных

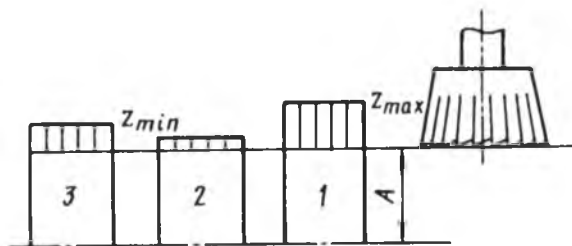


Рис. 1.10.19. Фрезерование заготовок с разной величиной припуска

факторов. Задача решается методом управления по текущим показателям процесса обработки.

Управление точностью по текущим показателям хода технологического процесса. Методы такого управления основаны на получении информации о точности относительного положения технологических баз заготовки и режущих кромок инструмента в процессе обработки через измерение показателей хода технологического процесса, с последующим преобразованием полученной информации в управляющий сигнал и внесении соответствующей поправки.

К преимуществам такого управления относится возможность компенсировать погрешность обработки в момент ее возникновения. В результате становится возможным компенсировать погрешности обработки от действия как систематических, так и случайных факторов.

К показателям хода технологического процесса относятся действующие силы, крутящий момент, упругие и тепловые перемещения, вибрации и другие показатели, находящиеся в функциональной связи с размером относительного положения заготовки и обрабатывающего инструмента. В процессе управления, измеряя значения того или иного показателя хода технологического процесса, сравнивают его с заданным значением и для устранения их разницы вносят поправки в те параметры, которые находятся в функциональной связи с измеряемой величиной. Например, если измеряют составляющую силы резания, то поправку вносят через изменение какого-либо аргумента ее функции, т. е. любой величины, стоящей в правой части уравнения силы резания:

$$P = C_p t^x S^y v^n \cdot \text{HRC} \cdot K,$$

где C_p – коэффициент, зависящий от материала заготовки и условий обработки; t – глубина резания; S – подача инструмента; v – скорость реза-

ния; HRC – твердость материала заготовки; K – коэффициент; x , y , n – показатели степени, зависящие от условий обработки.

С целью управления процессом технологическую систему оснащают различными чувствительными элементами для измерения одного или нескольких вышеуказанных показателей, преобразующими и сравнивающими устройствами, исполнительными механизмами, с помощью которых вносят соответствующие поправки в технологический процесс. В совокупности все эти устройства образуют систему автоматического управления.

Управление по показателям технологического процесса в зависимости от поставленной задачи можно осуществлять по программе, с обратной связью или комбинированным способом (рис. 1.10.20).

При *управлении по программе* решается задача сокращения погрешности обработки, обусловленная совокупным действием систематических факторов; *управление с обратной связью* позволяет сокращать погрешность, обусловленную случайными факторами; *комбинированное управление* позволяет сокращать погрешность обработки, образованную совокупным действием случайных и систематических факторов.

Были разработаны многочисленные способы повышения точности обработки посредством управления различными показателями хода технологического процесса [1, 7, 8].

Управление упругими перемещениями позволяет решить одну из наиболее трудных задач в проблеме повышения точности обработки –

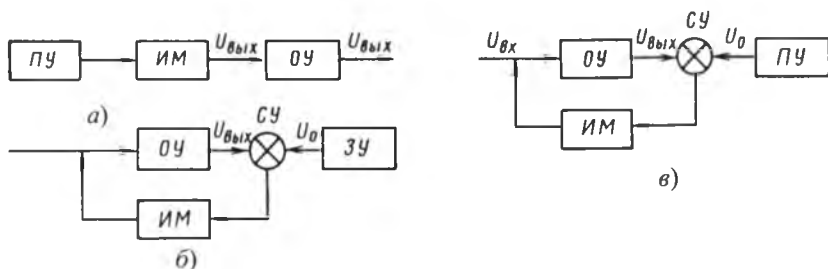


Рис. 1.10.20. Схема управления процессом поднастройки:

а – по программе; *б* – с обратной связью $U_0 = \text{const}$; *в* – комбинированным способом $U_0 = f(t)$; ПУ – программное устройство; ИМ – исполнительный механизм; ОУ – объект управления; ЗУ – задающее устройство; СУ – сравнивающее устройство

задачу сокращения динамической погрешности, которая возникает в момент непосредственного съема материала, что затрудняет ее измерение.

Управление упругими перемещениями технологической системы заключается в измерении относительного упругого перемещения y заготовки и режущего инструмента с последующим изменением значений параметров, функцией которых является y , или изменением относительного положения детали и инструмента для компенсации возникшего упругого перемещения.

Поскольку непосредственное измерение y во время обработки не представляется возможным, широкое распространение нашел косвенный метод. В качестве информации используют отклонения упругих перемещений звеньев технологической системы, силы резания или ее составляющих, крутящего момента, давления в цилиндре, потребляемой мощности, силы тока и других физических величин, связанных зависимостями с упругими перемещениями.

Главным условием получения высокой точности информации о y является наличие надежной и устойчивой зависимости между y и физической величиной μ , выбранной в качестве источника информации. Опыт показывает, что наилучшие результаты получаются, если в качестве источника информации выбирают упругие перемещения звеньев технологической системы или деформацию специальной детали определенной жесткости, встраиваемой в технологическую систему.

С помощью управления упругими перемещениями решаются следующие задачи повышения точности обработки: 1) уменьшение полей рассеяния погрешностей размеров, относительных поворотов и геометрических форм поверхностей в партии деталей; 2) уменьшение погрешностей размеров, относительных поворотов и геометрических форм поверхностей детали.

Воздействовать на величину упругих перемещений можно поразному. Наиболее часто в качестве параметра управления выступает характеристика, связанная с динамической настройкой технологической системы в соответствии с зависимостью

$$y = P_{\text{рез}} / j.$$

Из этой зависимости следует, что параметром управления может быть подача, скорость резания, геометрия режущей части инструмента и жесткость технологической системы.

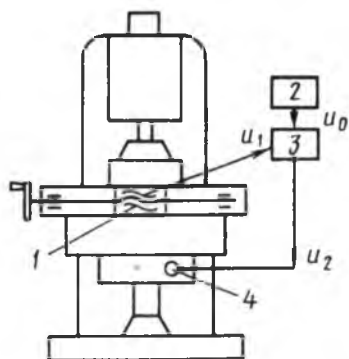


Рис. 1.10.21. Фрезерный станок с системами автоматического управления поднастройкой:
 1 – измерительное устройство;
 2 – задающее устройство;
 3 – сравнивающее устройство;
 4 – исполнительное устройство

Управление упругими перемещениями возможно и за счет изменения размера статической настройки. Например, при фрезеровании для компенсации возникающего упругого перемещения изменяют размеры статической настройки путем перемещения стола с заготовкой на величину, равную упругому перемещению, но с обратным знаком.

Рассмотрим примеры систем автоматического управления упругими перемещениями при решении различных задач повышения точности обработки деталей на станках.

На рис. 1.10.21 показан блок системы автоматического управления упругими перемещениями вертикально-фрезерного станка.

Во время фрезерования в каждый момент фрезерования, под действием многих факторов нарушается заданный закон относительного движения фрезы и технологических баз заготовки.

При фрезеровании доминирующим фактором очень часто являются упругие перемещения элементов технологической системы станка. Стабилизируя упругие перемещения технологической системы, можно существенно повысить точность фрезерования как одной детали, так и партии деталей.

Поскольку непосредственное измерение относительного положения режущих кромок фрезы и технологических баз заготовки не представляется возможным, так как зубья фрезы в это время режут металл, а технологическими базами заготовка контактирует с приспособлением, остается путь косвенного измерения их положения.

В связи с этим измерительное устройство 1 (рис. 1.10.21) контролирует упругое перемещение одного из элементов технологической системы – упругое перемещение гайки ходового винта относительно стола станка.

Исследованиями установлено, что между упругими перемещениями гайки и погрешностью обработки из-за относительного упругого пере-

мещения заготовки и фрезы существует однозначная зависимость. Поэтому по упругому перемещению гайки можно судить об относительном упругом перемещении детали и фрезы.

Как известно, упругое перемещение есть функция действующих сил и жесткости технологической системы. Наибольшее влияние при фрезеровании на величину упругого перемещения оказывает сила резания. Учитывая это обстоятельство, в качестве управляющего воздействия (параметра управления) выбрана величина продольной подачи стола станка, которая входит в формулу силы резания.

Работает система автоматического управления (САУ) следующим образом. Перед началом обработки с помощью соответствующего потенциометра и прибора со шкалой, проградуированной в единицах измерения относительного упругого перемещения заготовки и фрезы, задается уровень упругого перемещения (управляемая величина), который САУ должна поддерживать в течение всего времени обработки. Устройство 2 (рис. 1.10.21), с помощью которого задается уровень упругого перемещения, называется задатчиком, а значение задаваемой величины – уставкой. Уставка определяется из расчета обеспечения максимальной производительности обработки. Если уменьшить величину уставки, то для ее обеспечения потребуются вести фрезерование с меньшей силой резания. Следовательно, будет меньше среднее значение продольной подачи за рабочий ход и увеличатся затраты машинного времени, поэтому стремятся уставку задавать как можно больше. При этом в качестве ограничивающих факторов выступают прочность наиболее слабого звена технологической системы, мощность привода, технологические ограничения и др.

С помощью другого потенциометра устанавливается ограничение максимального значения продольной подачи S . Обычно в качестве ограничения $S_{\max}$ при черновом фрезеровании выступает максимально допустимая величина подачи на зуб S_z , а при чистовом фрезеровании – шероховатость обработанной поверхности.

Минимальное значение минутной подачи, как правило, не ограничивается, что позволяет САУ выполнять роль предохранителя от перегрузок технологической системы. После настройки САУ включается станок и начинается процесс фрезерования. В процессе фрезерования происходит непрерывное измерение фактического значения упругого перемещения гайки, которое преобразовывается в электрический сигнал u_1 , подаваемый на сравнивающее устройство 3. На вход сравнивающего устройства от задатчика поступает сигнал u_0 , пропорциональный заданному значению упругого перемещения гайки. Сигналы u_1 и u_0 алгебраически

суммируются. Если окажется, что они не равны, то на выходе сравнивающего устройства появится сигнал рассогласования u_2 соответствующего знака, равный их разности. Сигнал u_2 поступает на исполнительное устройство 4, представляющее в данном примере привод подачи, и изменяет величину продольной подачи (при этом знак рассогласования определяет увеличение или уменьшение продольной подачи). Величина подачи будет изменяться до тех пор, пока рассогласование не уменьшится до допустимого значения.

Описанная САУ, стабилизируя относительное упругое перемещение, тем самым стабилизирует размер относительного положения режущих кромок фрезы и технологических баз заготовки в каждый момент обработки, а следовательно, повышается и точность фрезерованных деталей.

Качество решения задачи повышения точности обработки во многом зависит от выбранного параметра управления упругими перемещениями.

Наиболее часто в качестве параметра управления выбирают подачу S . Это объясняется большим влиянием S на силу резания (при незначительном изменении S значительно изменяется сила резания) и простотой технического решения изменения S . Однако с изменением S изменяется шероховатость получаемой поверхности и колеблется основное технологическое время обработки. Все это накладывает ограничение на диапазон изменения S . Поэтому наибольший эффект получается, когда в системе управления применяется комбинация параметров управления. В качестве примера такого решения рассмотрим систему управления упругими перемещениями токарно-винторезного станка.

На рис. 1.10.22 показана блок-схема САУ упругими перемещениями посредством изменения величины продольной подачи S на оборот заготовки и жесткости технологической системы. Блок-схема САУ содержит два контура управления: первый стабилизирует упругое перемещение путем регулирования S , а второй – изменяет величину упругого перемещения посредством изменения по программе жесткости упругого элемента одного из звеньев размерной цепи, замыкающим звеном которой является расстояние между осью центровых отверстий заготовки и вершиной реза.

Первый контур САУ работает следующим образом. В процессе обработки с помощью динамометрического узла ДУ измеряется радиальная составляющая P_y силы резания, на выходе ДУ появляется сигнал u_1 , пропорциональный величине P_y , и поступает на сравнивающее устройство СУ1, где алгебраически суммируется с u_0 , поступающим с задающего устройства ЗУ и пропорциональным заданной величине P_{y0} .

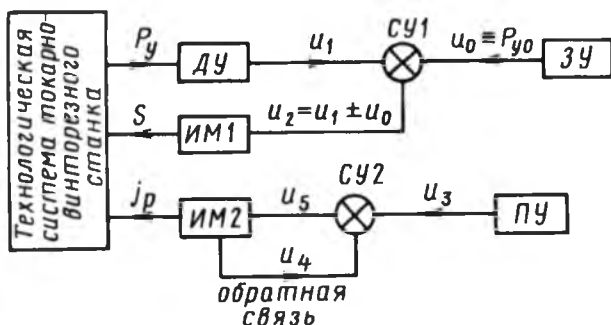


Рис. 1.10.22. Блок-схема двухконтурной САУ упругими перемещениями токарного станка:

ДУ – динамометрический узел; СУ1 и СУ2 – сравнивающие устройства; ЗУ – задающее устройство; ИМ1 и ИМ2 – исполнительные механизмы; ПУ – программное устройство

В случае разницы между u_1 и u_0 на выходе СУ1 появляется сигнал рассогласования u_2 , который подается на исполнительный механизм ИМ1, представляющий собой электромашинный усилитель ЭМУ и электродвигатель постоянного тока привода продольной подачи. Сигнал u_2 , усиленный с помощью ЭМУ, изменяет скорость вращения ротора электродвигателя и как следствие величину S , в сторону сокращения сигнала u_2 . Изменение S происходит до тех пор, пока сигнал u_1 станет равным сигналу u_0 , а это означает, что фактическая P_y стала равной заданной P_{y0} .

В задачу второго контура САУ входит изменение жесткости j_c технологической системы по заданной программе по пути продольного перемещения резца во время обработки. Изменение j_c осуществляется посредством изменения жесткости j_p регулируемого звена.

Программное управление жесткостью происходит следующим образом: с программного устройства ПУ поступает сигнал u_3 , пропорциональный величине j_p , которая обеспечивает требуемые значения j_c технологической системе по координате x перемещения резца вдоль оси заготовки. Сигнал u_3 через сравнивающее СУ2 поступает на ИМ2, с помощью которого изменяется величина j_p на нужную величину.

Полученное значение j_p контролируется датчиком положения, с которого сигнал u_4 по каналу обратной связи поступает на СУ2, где сравнивается с заданным u_3 . В случае их несовпадения появляется сигнал u_5 ,

который поступает на *ИМ2* и изменяет величину j_p так, чтобы она была равна требуемому значению.

В рассматриваемой САУ блоки *ДУ* и *ИМ2* совмещены в одном устройстве, схема которого приведена на рис. 1.10.23. Динамометрический узел представляет собой верхнюю часть суппорта. Это же устройство используется как *ИМ2* для регулирования j_p .

Во время обработки с этим суппортом действие радиальной составляющей силы резания передавалось через резец *1*, лежащий на роликах, на упругий элемент *2*, выполненный в виде плоской пружины, свободно лежащей на двух опорах. Опорами являлись гайки *3* с правой и левой резьбой, через которые проходил винт *4* тоже соответственно с правой и левой резьбой. Возникающий под действием силы P_y прогиб упругого элемента *2* измеряется индуктивным датчиком *6* и преобразовывается в электрический сигнал u_1 и подается на *СУ1*, т.е. работает как *ДУ*.

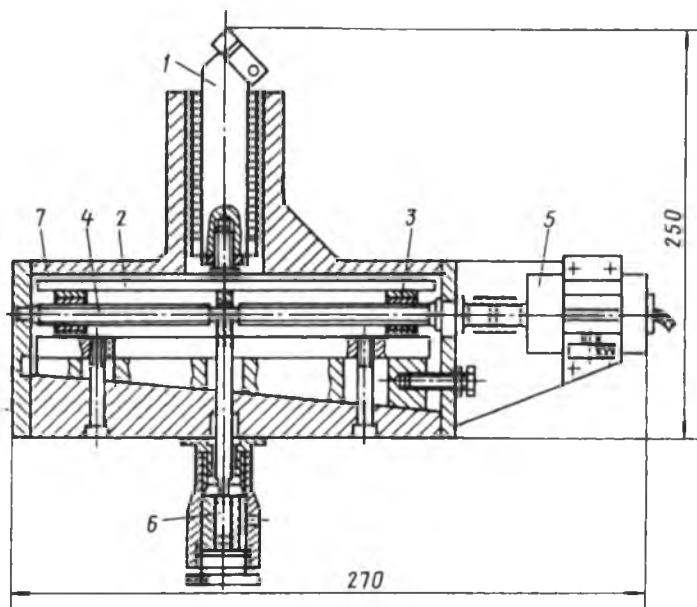


Рис. 1.10.23. Устройство для измерения P_y и изменения жесткости упругого элемента:

1 – резец; *2* – пружина (пластина); *3* – опоры; *4* – винт;
5 – электродвигатель; *6* – индуктивный датчик; *7* – корпус

Электродвигатель 5, вращая винт, меняет расстояние между гайками 3 и тем самым изменяет жесткость упругого элемента. Датчик 6 осуществлял также контроль перемещений упругого элемента во втором контуре.

Итак, рассмотренное устройство используется как для изменения жесткости технологической системы по заранее заданной программе, так и для стабилизации y по сигналу датчика 6. Во втором случае в системе управления должно быть предусмотрено вычислительное устройство, рассчитывающее требуемое значение жесткости технологической системы для компенсации возникшего отклонения.

Программа изменения жесткости технологической системы предназначена для компенсации совокупного действия систематических факторов путем соответствующего изменения величины упругого перемещения технологической системы.

Если известна функция $y = f(x)$, то для ее осуществления надо определить функцию $j_p = f(x)$.

Величина изменения упругого перемещения Δy_i , необходимая для компенсации погрешности диаметрального размера детали в i -м сечении детали, определяется по формуле

$$\Delta y_i = \frac{D_{0\max} - D_{0i}}{2}, \quad (1.10.2)$$

где $D_{0\max}$ — максимальный диаметральный размер после обработки детали с $P_{y\max} = \text{const}$; D_{0i} — диаметральный размер i -го поперечного сечения после обработки с $P_{y\max} = \text{const}$ и $j_{\max}$.

Требуемая величина жесткости технологической системы в i -м поперечном сечении вала для получения соответствующей величины упругого перемещения:

$$j_{ci} = \frac{P_{y\max}}{y'_i + \Delta y_i}, \quad (1.10.3)$$

где y'_i — упругое перемещение технологической системы в сечении после обработки с $P_{y\max} = \text{const}$.

Величина упругого перемещения y'_i определяется из формулы

$$y'_i = \frac{D_{0i} - D_{вп}}{2}, \quad (1.10.4)$$

где $D_{вп}$ — диаметральный размер i -го сечения после "выхаживания".

Напомним, что жесткость системы можно найти из равенства

$$\frac{1}{j_c} = \frac{1}{j_o} + \frac{1}{j_p}, \quad (1.10.5)$$

где j_p и j_o – жесткости соответственно регулируемого звена и остальных звеньев.

Подставив в уравнение (1.10.3) значение y'_i и $\Delta y'_i$, получим формулу для определения требуемой жесткости технологической системы (j_c) в i -ом поперечном сечении вала:

$$j'_{ci} = \frac{2P_{y\max}}{D_{0\max} - D_{bi}}. \quad (1.10.6)$$

Если изменение жесткости технологической системы осуществляется посредством регулирования жесткости одного звена, то необходимо рассчитать программу изменения его жесткости. Решив (1.10.5) относительно j_p , получим

$$j_p = \frac{j_c j_o}{j_o - j_c}. \quad (1.10.7)$$

Для i -го сечения требуемая жесткость j'_{pi} регулируемого звена для обеспечения j'_{ci} :

$$j_{pi} = \frac{j_o j'_{ci}}{j_{oi} - j'_{ci}}. \quad (1.10.8)$$

В этой формуле два неизвестных – j_{oi} и j_{pi} . Определим j_{oi} . Для этого решим уравнение (1.10.8) относительно i -го сечения:

$$j_{oi} = \frac{j_{ci} j_{pi}}{j_{pi} - j_{ci}}, \quad (1.10.9)$$

где j_{ci} – жесткость технологической системы в i -м сечении детали при обработке с $P_{y\max} = \text{const}$; j_{pi} – жесткость регулируемого звена в i -м сечении детали при обработке с $P_{y\max} = \text{const}$.

С помощью рассмотренной САУ можно решать задачи повышения точности обработки следующими вариантами управления:

- 1) стабилизация y посредством регулирования S ;
- 2) стабилизация y посредством регулирования j_c ;
- 3) программное изменение y регулированием S ;
- 4) программное изменение y регулированием j_c ;
- 5) стабилизация y в поперечном сечении и одновременное изменение y по программе вдоль оси x регулированием S ;
- 6) стабилизация y регулированием S и одновременно изменение y по программе вдоль оси x регулированием j_c .

Стабилизация у посредством регулирования S осуществляется при отключенном втором контуре и повышает точность обработки за счет сокращения поля рассеяния диаметральных размеров в партии деталей. Как показали результаты применения САУ, такого рода управление позволяет сократить в 2 – 3 раза поле рассеяния в партии обработанных деталей. Ограничением является изменение шероховатости обработанной поверхности; увеличение радиуса закругления при вершине резца или замена его на фаску снижает степень изменения шероховатости поверхности.

Стабилизация у посредством регулирования j_c осуществляется при отключенном первом контуре управления и повышает точность обработки тоже за счет сокращения поля рассеяния диаметральных размеров в партии деталей. На рис. 1.10.24 показаны точечная диаграмма изменения погрешности диаметральных размеров в партии валиков обработанных без САУ и с применением САУ стабилизирующей y путем регулирования j_c . Сначала было обработано девять трехступенчатых валов ($l = 350$ мм с приведенным диаметром, равным примерно 45 мм) обычным способом с $S = 0,3$ мм/об, $t_{\min} = 1$ мм, $n = 765$ об/мин резцом с твердосплавной пластиной Т15К6 с углами $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 5^\circ$, $\alpha = 12^\circ$; жесткость

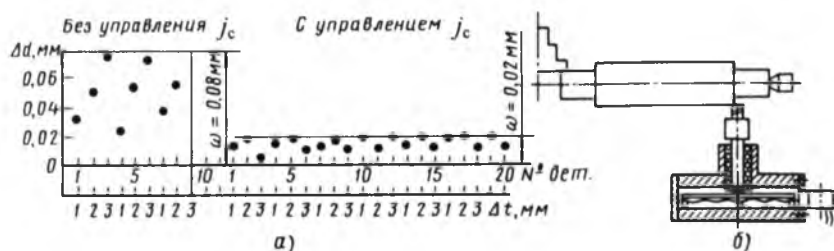


Рис. 1.10.24. Обработка валиков на токарно-винторезном станке:

a – точечная диаграмма погрешностей диаметрального размера;

b – схема обработки

суппорта равнялась 70 000 Н/мм. Перепады припуска Δt обрабатываемых ступеней показаны на точечной диаграмме.

Обработку деталей в количестве 20 шт. с регулированием жесткости производили на тех же режимах, что и при обычной обработке. Сравнение точечных диаграмм, построенных по данным обычной обработки и обработки с регулированием жесткости, показало, что во втором случае при прочих равных условиях колебание диаметрального размера, вызванное отклонениями величины упругого перемещения технологической системы, сократилось в 4 раза и не превышает 0,02 мм. К преимуществам этого способа относится возможность получения более высокой точности обработки за счет использования в качестве исполнительного механизма упругой технологической системы, отличающейся высокой чувствительностью, а также одновременного увеличения производительности за счет повышения режимов обработки в тех случаях, когда при обычной обработке вынуждены уменьшать режимы резания для обеспечения заданной точности.

К недостаткам способа относится невысокий уровень быстродействия САУ в отработке рассогласования при таком механизме ИМ. Если же использовать в САУ другие способы регулирования j_c , повышающие ее быстродействие, то этот способ управления будет предпочтительнее по сравнению с регулированием S .

Управление у по заданной программе регулированием S и с обратной связью по у. Применение этого способа управления ограничено из-за колебания шероховатости обработанной поверхности, обусловленной увеличением диапазона изменения S .

Управление у по программе регулированием жесткости позволяет достаточно надежно повышать точность формы детали в продольном сечении. На рис. 1.10.25 показаны графики погрешности формы валов в продольном сечении, обработанных без САУ и с САУ регулированием j_p .

Первая деталь обрабатывалась без изменения жесткости, а остальные детали с изменением жесткости по программе. Все детали обрабатывали с $t = 1$ мм, $v = 86$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об резцом с твердосплавной пластиной Т15К6 и углами $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 5^\circ$, $\alpha = 12^\circ$ и $r = 1,5$ мм. Анализ графиков показывает, что у деталей, обработанных с изменением жесткости по программе, погрешность формы уменьшилась в 5 раз и не превысила 0,02 мм. Как показали эксперименты, применение этого типа системы на токарно-винторезном станке при обработке деталей с равномерным припуском надежно обеспечивает точность геометрической формы в продольном сечении за один проход в пределах 0,01...0,02 мм. При этом имеет место повышение производительности обработки за счет сокращения

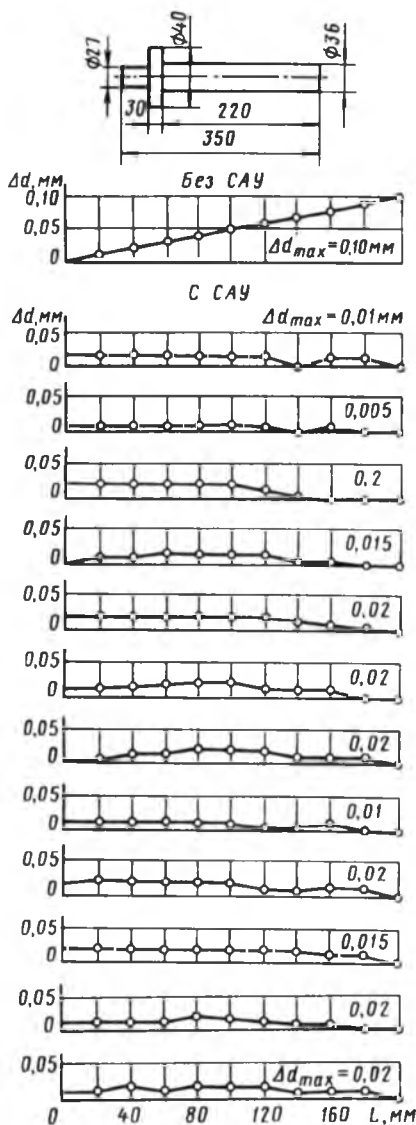


Рис. 1.10.25. Графики погрешностей геометрической формы валов в продольном сечении

числа проходов и увеличения продольной подачи, которая при обычной обработке занижается, чтобы получить такую же точность.

Способ управления величиной упругого перемещения по программе наиболее эффективен в тех случаях, когда колебания припуска и твердости материала заготовок незначительны и не оказывают существенного значения на погрешность обработки.

Стабилизация у регулированием S с одновременным изменением y по программе регулированием j_c (т.е. осуществление стабилизации закона y по пути прохода в партии деталей).

При таком способе управления сначала надо определить закон изменения y для компенсации совокупного действия систематических факторов. Трудность решения этой задачи заключается в том, что одновременно с систематическими факторами действуют и случайные.

Чтобы выделить систематическую составляющую погрешности формы в продольном сечении, первую заготовку обрабатывают с $P_y = \text{const}$ регулированием S , что сводит к минимуму влияние случайных факторов. Полученная погрешность формы в продольном сечении является результатом совокупного действия таких систематических факторов, как изменения реакций в переднем и заднем центрах при перемещении резца вдоль оси заготовки, изменение величины прогиба заготовки по пути движения резца, погрешность геометрической формы направляющих станины станка.

Итак, для расчета программы изменения j_p сначала нужно обработать одну деталь с $P_y = \text{const}$, причем для получения наивысшей производительности обработку первой детали следует производить с $P_{y \max} = \text{const}$, где величина $P_{y \max}$ выбирается из расчета прочности звеньев технологической системы с проверкой по мощности привода станка. Чтобы эта деталь не попала в брак, у нее на второй проход оставляется припуск, равный 0,2...0,3 мм.

Поскольку обработка первой детали производится с $P_y = P_{y \max} = \text{const}$, то при составлении программы изменения силы P_y значения P_{yi} не должны превышать $P_{y \max}$, а это означает, что компенсация погрешности формы описываемым способом будет осуществляться за счет уменьшения величины упругих перемещений технологической системы.

После обработки детали измеряют ее диаметральные размеры по длине через определенные промежутки. Чем точнее требуется получить геометрическую форму детали, тем меньше должны быть промежутки, через которые производят замеры размера детали.

Величина изменения упругого перемещения Δy_i технологической системы в измеряемом поперечном сечении для компенсации отклонений диаметрального размера по длине детали

$$\Delta y_i = \frac{D_{0i} - D_{0\min}}{2}, \quad (1.10.10)$$

где $D_{0\min}$ – минимальный диаметральный размер после обработки детали с $P_{y\max} = \text{const}$; D_{0i} – диаметральный размер i -го сечения после обработки с $P_{y\max} = \text{const}$.

По полученным данным рассчитывается закон изменения j_c , обеспечивающий изменение y с обратным знаком по пути движения резца, и затем программа изменения j_p .

По мере сокращения влияния упругих перемещений технологической системы на точность обработки доминирующими факторами становятся тепловые перемещения, геометрическая неточность станка и износ звеньев технологических системы. Систематическую составляющую погрешности от действия этих факторов можно уменьшить способами, приведенными выше, но случайная составляющая остается некомпенсированной.

Это потребовало решения новой задачи – сокращения влияния на точность обработки вышеперечисленных факторов и, в первую очередь, их случайных колебаний. Один из путей решения этой задачи – непосредственное измерение относительного положения обрабатываемой детали и режущего инструмента. Например, на горизонтально-расточном станке такая задача решалась измерением с помощью системы датчиков положения режущего инструмента и обрабатываемой детали относительно независимой системы координат и последующего определения их относительного положения посредством соответствующих вычислений.

Управление текущими показателями технологического процесса позволяет решать и задачи, связанные с повышением качества поверхностного слоя детали.

Как известно, влияние возмущающих факторов на изменения количественных значений характеристик поверхностного слоя проявляется через силу и температуру резания. В процессе формообразования поверхностей обрабатываемых деталей сила и температура не остаются постоянными, а изменяются вследствие колебания припуска, твердости заготовок, затупления режущего инструмента, изменения геометрии резания и т.п. При увеличении силы резания и степени пластических деформаций возрастает степень наклепа.

Увеличение продолжительности действия сил резания на поверхностный слой металла приводит к увеличению глубины распределения наклепа. Например, при токарной обработке наклеп поверхностного слоя растет с увеличением глубины резания, твердости исходного материала заготовки, подачи, радиуса при вершине резца и т.д.

При использовании САУ для поддержания постоянным силового режима стабилизируется глубина и степень наклепа. Например, при стабилизации силового режима колебание глубины наклепа не превышает 10 %, в то время как при обычной обработке она колеблется от нескольких десятков до сотен процентов в зависимости от колебания припуска.

Особенно эффективно удастся решать задачу повышения качества поверхностного слоя применения САУ при шлифовании за счет предотвращения прижогов. Оснащение шлифовальных станков САУ, стабилизирующего силовую нагрузку, повышает качество поверхностного слоя, исключает появление прижогов при одновременном увеличении производительности обработки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Три пути повышения точности обработки на технологическом переходе.
2. Способы повышения качества технологической системы.
3. Способы повышения жесткости технологической системы.
4. Способы повышения геометрической точности технологической системы.
5. Способы повышения теплостойкости технологической системы
6. Способы повышения износостойкости технологической системы.
7. Способы повышения виброустойчивости технологической системы.
8. Методы подавления действующих факторов при изготовлении деталей.
9. Способы сокращения упругих перемещений.
10. Способы сокращения тепловых перемещений.
11. Способы снижения вибраций.
12. Способы сокращения износа элементов технологической системы.
13. Сущность настройки и поднастройки технологической системы.
14. Понятие рабочего настроечного размера.

15. В чем проблема настройки технологической системы на заданный A_p ?
16. Как надо расположить "мгновенное" поле рассеяния (ω_T) в поле допуска при настройке технологической системы на изготовление одной детали?
17. Сущность метода пробных проходов.
18. Как надо располагать ω_T в поле допуска при изготовлении партии деталей?
19. Что такое средний групповой размер?
20. Способ определения ω_T с помощью двухступенчатой заготовки.
21. Мероприятия по сокращению трудоемкости настройки технологической системы при обработке заготовки одновременно несколькими инструментами.
22. Три метода управления точностью обработки, их преимущества и недостатки.
23. Управление по входным данным.
24. Управление по выходным данным.
25. Что такое "активный контроль"?
26. Для чего нужны контрольные границы на точечной диаграмме?
27. Сущность способа поднастройки малыми импульсами и его недостатки.
28. Управление точностью по текущим показателям хода технологического процесса.
29. Показатели технологического процесса, по которым можно судить о погрешности обработки.
30. Способы управления по показателям технологического процесса.
31. Управление по программе; преимущества и недостатки.
32. Управление с обратной связью, преимущества и недостатки.
33. Комбинированное управление.

Глава 1.11

**ОСНОВЫ ДОСТИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЯ
НА ПРОТЯЖЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Ограниченность возможностей современных технологических методов и средств изготовления, как правило, не позволяет в один технологический переход изготовить изделие и получить заданное качество. Поэтому любой технологический процесс представляет собой совокупность технологических переходов, объединенных в одну или несколько операций. В этой главе рассматриваются вопросы достижения качества детали, связанные с построением маршрута технологического процесса.

Наличие множества технологических переходов и операций порождает дополнительные факторы, влияющие на качество изготавливаемого изделия. К ним относятся смена технологических баз, взаимное влияние факторов, действующих при выполнении технологических переходов.

Взаимное влияние технологических переходов может привести к тому, что приобретенное качество (по какому-либо показателю) на предыдущем переходе при неправильной последовательности переходов будет утеряно при достижении качества (по другим показателям) на последующих переходах. Поэтому последовательность технологических переходов и операций оказывает большое влияние как на достижение заданного качества детали, так и на эффективность изготовления.

Процесс формирования геометрической точности детали, качества поверхностного слоя, структуры материала детали представляет собой весьма сложную картину взаимного влияния множества факторов, действующих при обработке заготовки. Картина становится еще более сложной из-за многовариантности технологического процесса как по составу технологических переходов, числу операций, так и по их последовательности. Поэтому технолог при разработке маршрута обработки заготовки должен учитывать эти обстоятельства и предусмотреть соответствующие мероприятия, исключающие негативное влияние последующих переходов на достигнутое качество или снижающие их влияние до допустимого уровня. Решение задачи осложняется тем, что деталь описывается большим числом показателей качества, требующих разных методов обработки.

Маршрут технологического процесса влияет на качество детали через размерные связи получаемых размеров и на характер изменения остаточных напряжений, возникающих в результате осуществления технологических переходов.

Знание размерных связей позволяет:

- а) рассчитывать межпереходные размеры получения каждой поверхности детали и припуски на обработку;
- б) рассчитывать допуски на операционные размеры, определяющие точность относительного положения поверхностей детали;
- в) правильно выбирать технологические базы;
- г) выбирать последовательность технологических переходов и операций для достижения геометрической точности детали по всем показателям.

Знание изменения остаточных напряжений в заготовке по мере осуществления технологических переходов позволяет:

- а) определять последовательность технологических переходов для достижения заданного качества поверхностного слоя;
- б) предусматривать мероприятия по устранению геометрических погрешностей, вызванных деформациями заготовки из-за перераспределения остаточных напряжений.

В гл. 1.11 рассматриваются методы расчета, рекомендации по построению маршрута изготовления изделия, обеспечивающие достижение заданного качества изделия по ходу технологического процесса.

1.11.1. СНИЖЕНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ НА КАЧЕСТВО ДЕТАЛИ

Все показатели качества детали можно свести к двум группам:

- показатели геометрической точности детали (точность размера, формы, шероховатости, относительного положения поверхностей);
- показатели качества поверхностного слоя и детали в целом (остаточные напряжения, наклеп, структура материала).

При построении маршрута необходимо так выбирать последовательность достижения показателей качества (как в пределах одной группы, так и обеих групп), чтобы взаимное влияние технологических переходов не нарушало достигнутого качества на предыдущих технологических переходах.

В основе любого технологического перехода лежит соответствующий метод и режим обработки; метод обработки, в общем случае, оказывает влияние на все показатели качества детали. Поэтому, чтобы правильно выбирать методы обработки технологических переходов, надо знать влияние их на каждый из показателей качества не только на качественном, но и на количественном уровне. К сожалению, об этом в имеющейся справочно-нормативной литературе можно найти только весьма

приближенную информацию. В итоге выбор последовательности технологических переходов по достижению качества детали осуществляется технологом на основе его опыта, проведения экспериментов и носит в значительной степени субъективный характер, что и определяет длительную обработку технологических процессов.

Ниже излагаются рекомендации по снижению негативного взаимного влияния технологических переходов на достижение качества детали по ходу технологического процесса.

Борьба с негативным взаимным влиянием технологических переходов ведется посредством правильного выбора методов обработки, значений элементов режима обработки, последовательности технологических переходов и введением дополнительных технологических переходов, компенсирующих их взаимное влияние.

При обеспечении геометрической точности изготовления поверхности детали возникает задача определения состава технологических переходов, их содержания и последовательности для достижения точности ее размера, формы и шероховатости. Объясняется это тем, что для достижения заданной точности по разным показателям приходится применять разные методы обработки.

Рассмотрим этот вопрос на конкретном примере. Пусть требуется изготовить крупную партию стальных гладких цилиндрических валков с $d = 25$ мм, длиной 60 мм, допуском на диаметр $T_d = 2$ мкм и отклонениями формы и шероховатости, не выходящими за пределы T_d .

В качестве заготовки примем калиброванный пруток с допуском на диаметральный размер 280 мкм и с отклонениями формы, не выходящими за пределы 100 мкм и шероховатостью не более 40 мкм.

Принимая во внимание значения допусков на деталь и заготовку по трем показателям точности, можно установить значения уточнений ε , которые необходимо обеспечить на технологических переходах:

- по диаметральному размеру

$$\varepsilon_d = \frac{280}{2} = 140;$$

- по форме

$$\varepsilon_\phi = \frac{100}{2} = 50;$$

— по шероховатости

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \frac{40}{2} = 20.$$

Исходя из значений уточнений, выбирают методы обработки, позволяющие достичь заданную точность детали по каждому показателю.

Уже из разницы значений уточнения следует, что для достижения точности цилиндрической поверхности валиков придется обработку заготовок осуществлять в несколько технологических переходов, так как отсутствуют технологические системы с уточнением в 140 раз.

Сначала выберем метод обработки для получения заданной шероховатости цилиндрической поверхности. Анализ известных методов показывает, что для достижения заданной шероховатости можно воспользоваться суперфинишированием или притиркой. Суперфиниширование, обеспечивая требуемую шероховатость поверхности, практически не позволяет по своей природе получить требуемое уточнение $\varepsilon_d = 140$ для достижения точности диаметрального размера и формы валиков.

Притирка (в отличие от суперфиниширования) позволяет получить экономично не только требуемую шероховатость поверхности, но и точность размера и формы в пределах требуемых допусков при условии, что поступающие на притирку детали имеют припуск на обработку не более 5...20 мкм на диаметр (для стали) при отклонениях формы в пределах допуска $T_{\Phi 3} = 15$ мкм, т.е. притирка экономично может дать уточнение:

$$\varepsilon_1 = \frac{T_{\Phi 3}}{T_d} = \frac{15}{2} = 7,5.$$

Сопоставляя эту величину с требуемой $\varepsilon_d = 140$, видим, что осуществить переход от заготовки к готовой детали путем одного метода обработки не представляется возможным. Необходимо найти еще один или несколько методов обработки, которые обеспечили бы получение оставшегося значения уточнения

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_1} = \frac{140}{7,5} = 18,6.$$

Таким образом, надо включить в процесс изготовления валиков как минимум один предварительный технологический переход.

Для обработки крупной партии калиброванных валиков в качестве высокопроизводительного метода следует принять бесцентровое шлифо-

вание, которое при заданном припуске может обеспечить точность диаметра в пределах 100 мкм.

Отсюда получим

$$\varepsilon_2 = \frac{280}{100} = 2,8.$$

Тогда в результате осуществления двух технологических переходов получим суммарную величину уточнения $\varepsilon_4 = \varepsilon_1 \times \varepsilon_3 = 7,5 \times 2,8 = 21$ вместо $\varepsilon = 140$.

Следовательно, между притиркой и бесцентровым шлифованием необходимо ввести еще один технологический переход – предварительную притирку с уточнением

$$\varepsilon_5 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_4} = \frac{140}{21} = 6,8.$$

Это возможно при условии, если заготовки, поступающие на предварительную притирку, имеют отклонение по диаметральному размеру не более 100 мкм, что обеспечивается предшествующим бесцентровым шлифованием.

Таким образом, для достижения заданной точности валиков необходимо осуществить три технологических перехода: бесцентровое шлифование, предварительную притирку и окончательную притирку, которые обеспечат требуемое уточнение:

$$\varepsilon = \varepsilon_3 \times \varepsilon_5 \times \varepsilon_1 = 2,8 \times 6,8 \times 7,5 = 142,8.$$

Из приведенного примера видна связь между технологическими переходами и обоснованность их последовательности при достижении всех показателей точности цилиндрической поверхности валиков.

При изготовлении всех поверхностей детали необходимо принимать во внимание взаимное влияние технологических переходов по их изготовлению. Взаимное влияние технологических переходов объясняется возникновением остаточных напряжений.

Например, при обработке резанием в случае съема больших припусков в заготовке могут возникнуть большие внутренние напряжения, которые при осуществлении последующих технологических переходов перераспределяются, вызывая собственные деформации заготовки, изменяющие ее геометрию.

В результате достигнутая на первых технологических переходах геометрическая точность теряется. В зависимости от конструкции заго-

товки и ее материала, а также от уровня действовавшей силовой нагрузки отклонения геометрии заготовки могут вызвать погрешность обработки больше заданного допуска.

В таких случаях следует съем всего припуска осуществлять в несколько технологических переходов. Если и в этом случае погрешности, вызванные деформациями заготовки, оказываются больше заданного допуска или существенно снижается производительность обработки, то необходимо предусмотреть следующее.

Перед окончательной обработкой следует ввести технологический переход по снижению или выравниванию остаточных напряжений посредством "старения". Затем необходимо обработать технологические базы, от которых обрабатываются поверхности, для устранения погрешностей, вызванных деформациями заготовки. Только после этого следует производить окончательную обработку поверхностей.

Такая же картина наблюдается, когда в технологический процесс включают технологические переходы, связанные с достижением заданного качества поверхностного слоя и структуры всего материала заготовки.

В этих случаях применяются технологические переходы, базирующиеся на различных методах упрочнения и термической обработки. Воздействие этих методов сопровождается высокими усилиями и температурами с теми же последствиями.

Снижение их влияния на достижение качества детали осуществляется или уменьшением их воздействия или компенсацией возникших погрешностей.

Целью термической обработки является:

- 1) снижение остаточных напряжений в материале детали;
- 2) улучшение обрабатываемости материала;
- 3) повышение механических свойств материала до значений, требуемых техническими условиями на изготовление детали.

Некоторые виды термической обработки осуществляются до начала механической обработки заготовки; другие виды перемежаются с процессами механической обработки.

До начала механической обработки выполняют нормализацию, отжиг, старение заготовок с целью снижения остаточных напряжений, выравнивания неоднородности структуры материала (это важно, если требуются последующая закалка и улучшение обрабатываемости материала заготовки).

Повышение механических свойств (твердости, прочности) материала достигается закалкой и отпуском, которые, как правило, приходится включать на этапе механической обработки заготовки.

Осуществлению закалки и отпуска после окончательной механической обработки препятствует то, что деталь в процессе термообработки теряет полученную точность.

Кроме того, в процесс механической обработки приходится включать термическую операцию для снижения остаточных напряжений, вызванных самой механической обработкой, поэтому операциям закалки и отпуска заготовки отводят место между предварительными и финишными операциями.

Неизбежным разрыв процесса механической обработки становится, когда повышение твердости материала детали достигается цементацией и последующей закалкой. Если цементации подвергаются все поверхности детали, то термические операции (цементацию, закалку, отпуск) предусматривают перед окончательным этапом обработки. В таком случае окончательный этап должен целиком состоять из операций, выполняемых абразивными инструментами, поэтому припуски на этот этап оставляют минимально возможными.

Однако значительно чаще встречается требование цементировать только некоторые поверхности детали (местная цементация). В этом случае место термических операций определяется в основном способом защиты от цементации тех поверхностей, которые не должны ей подвергаться.

Для их защиты вводятся технологические переходы, базирующиеся на следующих способах:

- 1) омеднение поверхностей, не подлежащих цементации;
- 2) оставление повышенного (на величину глубины цементации) припуска на поверхностях, не подлежащих цементации, который снимают после цементации, но до закалки;
- 3) комбинацию первого и второго способов – омеднение для одних поверхностей, но оставление повышенного припуска и омеднение (двойная защита) – для других.

Первый способ самый простой. Он позволяет выполнить цементацию и закалку одну за другой, притом наиболее технологически удобно – перед окончательным этапом механической обработки. Этот способ особенно выгоден, если уровень заданной точности детали позволяет выполнить до цементации и закалки (на заключительном этапе) все технологические переходы, требующие инструментов с металлическими лезвиями. В этом случае после цементации и закалки остается минимум механической обработки – шлифование особо точных поверхностей.

Второй способ более надежен, но требует увеличения припусков. Кроме того, цементацию приходится делать на одном этапе обработки, а закалку и отпуск – на другом.

При большой площади защищаемых поверхностей по сравнению с площадью цементуемых получается, что деталь нужно направлять на цементацию в сущности после предварительного этапа обработки, но с малыми припусками на цементуемых поверхностях. Поэтому процесс существенно усложняется, если эти поверхности мало пригодны для роли установочных баз (они должны служить базами, так как имеют минимальные припуски). К тому же после чистовой обработки деталь нужно еще раз направлять в термический цех (для закалки), поэтому второй способ защиты по возможности целесообразно избегать.

Третий способ обладает достоинствами первых двух, но лишен их недостатков.

Случайные дефекты омеднения (первый способ защиты) малосущественны, если окончательный этап процесса состоит из операций шлифования; однако они недопустимы для поверхностей под цементуемые шлицы, резьбу и другие подобные поверхности, обрабатываемые металлическими инструментами. Поэтому такие поверхности защищают повышенным припуском (второй способ защиты). Омедняя наряду с другими нецементуемыми поверхностями также и поверхности с повышенным припуском (двойная защита), получают возможность выполнить цементацию и закалку в одно время.

При третьем способе защиты характер части процесса, выполняемой после цементации и закалки, зависит от того, какова доля обработки поверхностей с повышенными припусками. По мере увеличения этой доли все больше стираются черты, характерные для первого способа защиты (омеднение) и усиливаются особенности, свойственные второму (повышенный припуск).

Прибегая к омеднению, обеспечивают отсутствие защитного слоя на поверхностях, подлежащих цементации, одним из двух способов:

- 1) омедняют только защищаемые поверхности, предохраняя от омеднения поверхности, подлежащие цементации (покрывая их диэлектриками – чаще всего специальными лаками);
- 2) омедняют деталь кругом, но до обработки цементуемых поверхностей под цементацию.

Во втором случае получается два разрыва в процессе механической обработки: после покрытий деталь попадает не в термический цех, а воз-

вращается в механический; при обработке под цементацию снимается вместе с припуском и защитный слой.

Процесс на цементуемую деталь надо строить так, чтобы окончательный этап (обработка после цементации и закалки) содержал минимум операций. Это обусловлено тем, что погрешности установки детали и погрешности от несовмещения баз компенсируются припусками, предусмотренными на последующую обработку, вследствие чего изменяются величины этих припусков, а главное – нарушается их равномерность. Это малозначительно для грубых операций, но нежелательно для точных. Между тем, цементуемые поверхности – это, как правило, точные поверхности, а их окончательная обработка часто требует малопроизводительных методов шлифования (к таким поверхностям относятся зубья, шлицы, профили и т.п.). При такой обработке всегда желательны наименьшие припуски и наибольшая равномерность их распределения, поэтому уже перед цементацией следует обеспечить хорошие технологические базы для последующего этапа и достаточно малые припуски. Чем меньше будет операций после цементации и закалки, тем меньше будет установок детали, погрешностей от несовмещения баз и связанных с ними изменений предусмотренных припусков.

Уменьшению припусков препятствуют искажения формы детали из-за деформаций в процессе цементации и закалки. Для уменьшения искажений предусматривают снятие остаточных напряжений, возникающих после черновой обработки. Применяемая для этого термообработка особенно необходима, если деталь имеет цементуемую поверхность, размеры которой нельзя изменить после цементации и закалки. Она еще более необходима, если такая поверхность не может служить технологической базой для обработки других.

Процесс обработки детали, имеющей точные азотируемые поверхности (обычно задают глубину слоя 0,3...0,5 мм), строят, руководствуясь теми же соображениями, что и в случае цементации. Для защиты незазотируемых поверхностей применяют лужение.

Твердость азотированного слоя резко падает по глубине (зона максимальной твердости распространяется на глубину около 0,1 мм), поэтому определение минимального числа операций в окончательном этапе, процессы подготовки хороших установочных баз для этого этапа, уменьшение припусков путем точной чистовой обработки перед азотированием и т.д. те же самые, как и при цементации поверхностей, с которых нельзя снимать значительные припуски на окончательном этапе.

1.11.2. РАСЧЕТ МЕЖПЕРЕХОДНЫХ РАЗМЕРОВ И ПРИПУСКОВ НА ОБРАБОТКУ

В тех случаях, когда для получения поверхности детали заготовка подвергается многократной обработке, возникает необходимость в определении межпереходных размеров. При этом не имеет значения, получается ли поверхность детали результатом обработки разными методами или одним методом в несколько рабочих ходов. В любом случае, чтобы получить годную поверхность, нужно рассчитывать межпереходные размеры, припуски и допуски.

Припуском на обработку принято называть слой материала, удаляемый с поверхности, образующейся в результате обработки детали. Слой материала, удаляемый с поверхности, образующийся в результате выполнения каждого перехода, называется межпереходным. *Межпереходный припуск* определяется как разность размеров, полученных на детали на предшествующем и данном переходах.

Слой материала, удаляемый с поверхности готовой детали в результате выполнения всех переходов технологического процесса, называется общим припуском на обработку. *Общий припуск* на обработку определяется разностью размеров заготовки и готовой детали, измеренных от одной базы.

Различают односторонние припуски на обработку (рис. 1.11.1, а), понимая под ними слои материала, удаляемые с какой-либо одной стороны детали, двусторонние, удаляемые с двух сторон (рис. 1.11.1, б) или с образующих (рис. 1.11.1, в) детали.

Двусторонние припуски на обработку в зависимости от величины их слагаемых, расположенных на каждой из сторон или по образующим детали, делятся на симметричные и ассиметричные. У симметричного припуска на обработку величины его слагаемых с каждой из сторон или под образующим детали равны между со-

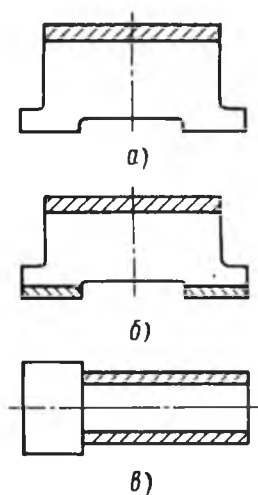


Рис. 1.11.1. Схемы расположения припусков на обработку:
а — одностороннее; б — двустороннее;
в — симметричное

бой (рис. 1.11.1, в), у асимметричного припуска эти величины не равны (рис. 1.11.1, б).

Необходимо различать:

- расчетный (или номинальный) размер припуска, устанавливаемый расчетом;
- действительный размер припуска, т.е. величину слоя материала, фактически удаляемого при обработке деталей;
- измеренный размер припуска, полученный путем измерения и вычисления.

Припуски на обработку возникли из-за необходимости компенсации:

1) погрешности установки ω , заготовки или детали на станке, в приспособлении или на рабочем месте. Чем больше погрешность установки (перекос α), тем больший припуск необходимо иметь для ее компенсации. Из рис. 1.11.2 видно, что при недостаточной величине припуска поверхность детали может оказаться неполностью обработанной. В результате, на вновь полученной поверхности останется часть поверхности a , образованной на предыдущем переходе, как это показано на рис. 1.11.2;

2) погрешностей относительных поворотов поверхностей заготовок или обрабатываемых деталей, поступающих на данный переход;

3) погрешностей формы поверхностей заготовок или деталей, если эти погрешности по каким-либо причинам могут выходить за пределы допуска на размер (например, в результате термообработки, деформации, происходящие вследствие перераспределения остаточных напряжений и т.д.);

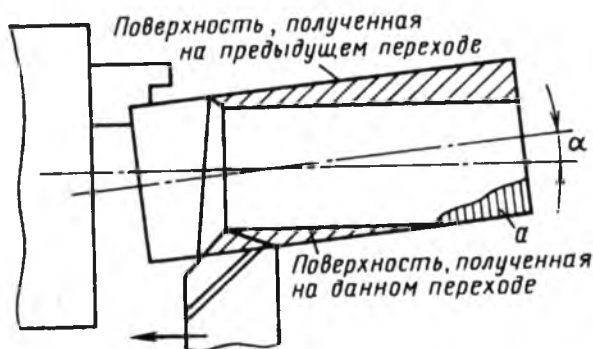


Рис. 1.11.2. Сохранение части поверхности, полученной на предшествующем переходе, из-за погрешности установки заготовки

4) следов режущего инструмента, оставшихся от предшествующего перехода, в виде шероховатости поверхности;

5) удаления дефектного поверхностного слоя материала, если он появляется в результате выполнения предшествующего перехода и может сохраниться частично или возрасти на данном переходе.

Следовательно, для компенсации всех рассмотренных погрешностей, оказывающих влияние на качество поверхности детали, получаемой на данном переходе, необходимо оставлять наименьший припуск $Z_{\text{нм}}$, для расчета которого может служить формула

$$Z_{\text{нм}} = H_{\text{нб}} + T + P + \Phi + Y,$$

где $H_{\text{нб}}$ – расчетная высота микронеровностей, установленная для поверхности детали, получаемой на предыдущем переходе; T – расчетная глубина дефектного поверхностного слоя, получаемого на предыдущем переходе; P – расчетная величина погрешности относительных поворотов поверхности детали, получаемой на предыдущем переходе; Φ – расчетная величина погрешности формы поверхности детали, получаемой на предыдущем переходе; Y – расчетная величина погрешности установки детали на данном переходе.

В формулу входят расчетные, т.е. номинальные величины погрешностей, несмотря на то, что практически погрешности всегда будут иметь отклонения в каких-то пределах. Поэтому было бы правильнее, наряду с расчетом номинальных величин, ввести расчет допусков на припуски, для которого необходимо разработать методику расчета, которая позволила бы установить допуски на все величины, входящие в формулу.

Все перечисленные погрешности можно рассматривать как независимые или малозависимые величины. При выполнении технологических процессов часть этих погрешностей, естественно, может взаимно компенсироваться. Вследствие этого для расчета минимально необходимого припуска на обработку можно использовать вероятностный метод расчета, если пойти на некоторую долю риска получения у части деталей поверхностей, на которых может оказаться недостаточный припуск на обработку.

При расчете минимально необходимого припуска на обработку следует всегда учитывать конкретные условия протекания разрабатываемого технологического процесса, так как в зависимости от этого, в ряде случаев, часть слагаемых будет не нужна. Благодаря этому можно существенно уменьшить минимальный припуск на обработку, сэкономив материал и расходы, затрачиваемые на его удаление при обработке. Например, при

выполнении ряда технологических процессов дефектный слой настолько незначителен, что он легко удаляется за счет других составляющих припуска на обработку и для его компенсации специально оставлять слой материала нет необходимости.

Зная минимальный межпереходный припуск на обработку, можно рассчитать и его максимальную величину:

$$Z_{нб} = T_n + Z_{нм} + T_d,$$

где T_n – допуск на расстояние или размер поверхности, установленный для предыдущего перехода; $Z_{нм}$ – наименьший расчетный припуск, установленный для данного перехода; T_d – допуск на расстояние или размер поверхности, установленный для данного перехода.

Взаимосвязи между межпереходными припусками на обработку и полями их колебаний приведены на рис. 1.11.3, из которых схема на рис. 1.11.3, а дана для охватываемого, а схема на рис. 1.11.3, б – для охватывающего размеров.

Используя приведенные схемы, можно рассчитать межпереходные средние и предельные размеры. Для этого необходимо выбрать начало отсчета. Если, например, за начало отсчета выбрать наибольший из допустимых размеров готового вала, то предельные межпереходные размеры, как это видно из рис. 1.11.3, а, для последнего перехода

$$D_1^{нб} = D + Z_1^{нм} + T_1;$$

$$D_1^{нм} = D + Z_1^{нм},$$

а для предыдущего перехода

$$D_2^{нб} = D_1^{нб} + Z_2^{нм} + T_2;$$

$$D_2^{нм} = D_1^{нб} + Z_2^{нм}.$$

Обозначая индексом "п" предыдущие переходы, а индексом "д" данный переход, можно написать для любого перехода (при принятом начале отсчета $D_{нб}$ готовой детали):

$$D_d^{нб} = D_n^{нб} + Z_d^{нм} + T_d;$$

$$D_d^{нм} = D_n^{нб} + Z_d^{нм}.$$

Аналогично, для охватывающих размеров при принятом на рис. 1.11.3, б начале отсчета (за которое принят наименьший допустимый диаметр готового отверстия), получаем:

$$D_1^{\text{нб}} = D_0 - Z_1^{\text{нм}};$$

$$D_1^{\text{нм}} = D_0 - Z_1^{\text{нм}} - T_1.$$

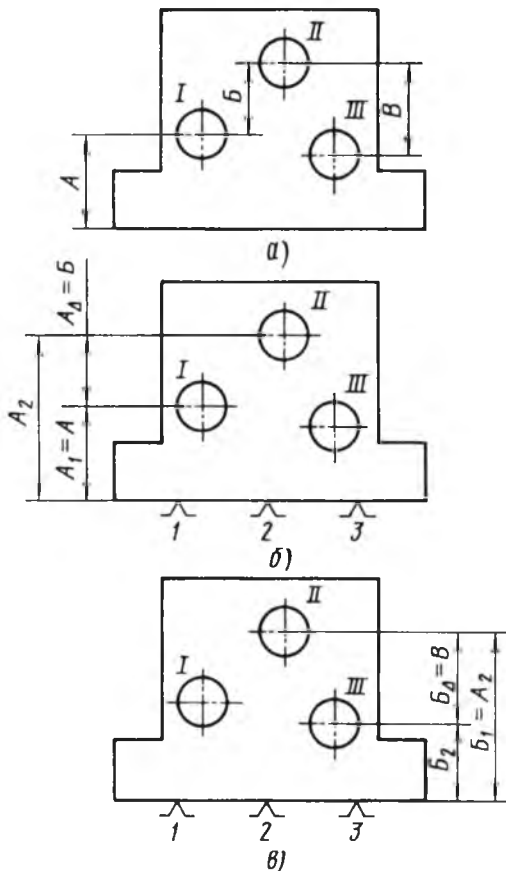


Рис. 1.11.4. Координирующие размеры центров отверстий:

a – на чертеже детали; *б* – после обработки отверстия I от технологической базы, совпадающей с конструкторской; *в* – после обработки отверстий II и III от технологической базы, не совпадающей с конструкторскими

В общем случае, при принятом начале отсчета

$$D_{\text{д}}^{\text{нб}} = D_{\text{п}}^{\text{нм}} - Z_{\text{д}}^{\text{нм}};$$

$$D_{\text{д}}^{\text{нм}} = D_{\text{п}}^{\text{нм}} - Z_{\text{д}}^{\text{нм}} - T_{\text{д}}.$$

Симметричные припуски на обработку обычно устанавливаются на поверхностях, получаемых вращением образующей вокруг оси (цилиндрические, конические и т.д.). Ассиметричные припуски устанавливаются на размеры, связывающие поверхности или оси поверхностей детали.

Из изложенного видно, что предельные межпереходные размеры устанавливаются в зависимости от выбранной системы отсчета, т.е. системы расположения поля устанавливаемого допуска относительно номинальной величины размера. Например, при симметричной системе расположения поля допуска на размер в качестве номинальных размеров берутся средние размеры

$$A_{\text{ср}} = \frac{A_{\text{нб}} + A_{\text{нм}}}{2}.$$

В таких случаях в качестве номиналов при расчете межпереходных размеров надо брать их средние величины, в том числе и средний припуск

$$Z_{\text{ср}} = \frac{Z_{\text{нб}} + Z_{\text{нм}}}{2}.$$

Для определения допусков на межпереходные размеры необходимо знать режимы обработки и передаточное отношение технологической системы, на которой осуществляется обработка. Однако в паспорте станка не указывается передаточное отношение и поэтому на практике для установления допусков на межпереходные размеры пользуются "средней" экономически достижимой точности, приводимой в соответствующих справочниках, а также на основе опыта технолога, учитывающего фактическое состояние конкретного станка.

Даже в стандартах на проверку станков не регламентированы режимы обработки и входные данные обрабатываемых образцов или деталей, при которых должна достигаться точность их обработки на новых станках. Для упорядочения решения рассматриваемой задачи в стандартах на проверку новых станков необходимо ввести точностные характеристики образцов или деталей и условия, при которых они могут быть получены.

В качестве таких характеристик можно указать значения уточнения ϵ , или передаточного отношения ξ с обязательной регламентацией условий, при которых должны производиться испытания (входные данные технологической системы, колебания припуска и твердости материала, режимы обработки, геометрия и состояние режущего инструмента и т.д.).

1.11.3. РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ОПЕРАЦИОННЫЕ РАЗМЕРЫ ПРИ НЕСОВПАДЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ С КОНСТРУКТОРСКИМИ БАЗАМИ

Стремление использовать принцип единства баз на операциях технологического процесса приводит к тому, что при обработке целого ряда поверхностей деталей их конструкторские базы не совпадают с технологическими.

В этом случае возникают размерные цепи, с помощью которых выявляются те размеры, на которые надо назначать допуски, обеспечивающие точность относительного положения поверхностей, заданных на чертеже детали.

Пусть, к примеру, на чертеже корпусной детали координатные размеры трех отверстий заданы цепным методом (на рис. 1.11.4, а) и $T_A = T_B = T_B$. При использовании принципа единства баз (рассмотрим получение размеров в вертикальном направлении), когда все отверстия получаются от одного комплекта технологических баз, возникнут размерные цепи A, B, B .

У отверстия I конструкторская база совпадает с технологической базой и ее операционный размер совпадает с координатным размером, заданным чертежом (рис. 1.11.4, б).

При обработке отверстия II наблюдается несовпадение конструкторской базой с технологической, вследствие чего возникла размерная цепь A , где замыкающим размером ($A_\Delta = B$) является координатный размер B отверстия II , заданный на чертеже, а составляющими звеньями размерами A_1 и A_2 – координирующие размеры, получаемые при обработке соответственно отверстий I и II . Чтобы обеспечить заданный T_B на размер B , надо определить размер A_2 и допуск на него T_{A_2} .

Размер A_2 находится из равенства $A_2 = A_\Delta + A_1$, где $A_1 = A$ и $A_\Delta = B$, а $T_{A_2} = T_{A_\Delta} - T_{A_1}$.

Если допуски на координирующие размеры A и B равны, то получим

$$T_{A_2} = T_{A_\Delta} - T_{A_1} = 0.$$

Тогда увеличение допуска T_{A_2} возможно только за счет уменьшения допуска T_{A_1} . Если принять $T_{A_1} = T_{A_2}$, то

$$T_{A_2} = \frac{T_{A_\Delta}}{2},$$

т.е. допуск на размер A_2 стал в 2 раза меньше допуска T_B .

Теперь надо рассчитать координату середины поля допуска размера A_2 . Поскольку известны из чертежа детали Δ_{0A} и Δ_{0B} , то

$$\Delta_{02} = \Delta_{0A} - \Delta_{0B}.$$

Аналогичные расчеты проводятся и для горизонтальных координирующих размеров. При обработке отверстия III возникает размерная цепь B (рис. 1.11.4, *в*), где замыкающим звеном B_Δ является координирующий размер отверстия III , заданный на чертеже детали, а составляющими звеньями являются операционные размеры отверстий I (размер A_2) и III (размер B_2), где $B_1 = A_2$. Расчеты размера B_1 и T_{B_1} производятся по той же схеме.

Таким образом, в расчете размерных связей, обусловленных несопадением конструкторских баз с технологическими, необходимо рассчитать номинальные значения координирующих размеров и относительных поворотов изготавливаемых поверхностей, их допуски и координаты середин полей допусков.

Рассмотрим в качестве иллюстрации к изложенному пример расчета при обработке отверстия в корпусной детали (рис. 1.11.5, *а*), когда его конструкторская база не совпадает с технологической базой (рис. 1.11.5, *б*).

Исходные данные: $A_1 = 100$ мм, $A_3 = 400$ мм, $T_{A_1} = 0,05$ мм, $\Delta_{0A_1} = 0,2$ мм, допуск на отклонение оси отверстия от параллельности к основанию $T_{\gamma_1} = \pm 0,02/300$ мм.

При выборе в качестве технологической базы плоскости, противоположной основанию (рис. 1.11.5, *б*), возникнут размерные цепи и цепи поворотов (рис. 1.11.5, *в*). В связи с этим необходимо найти допуски на звенья A_2 , A_3 , γ_2 , γ_3 , обеспечивающие величины допусков на звенья A_1 и γ_1 , заданные на чертеже детали (рис. 1.11.5, *а*).

Рассчитаем необходимые допуски для звеньев A_3 , A_2 , γ_3 и γ_2 , в пределах которых необходимо выдержать их отклонения, чтобы иметь

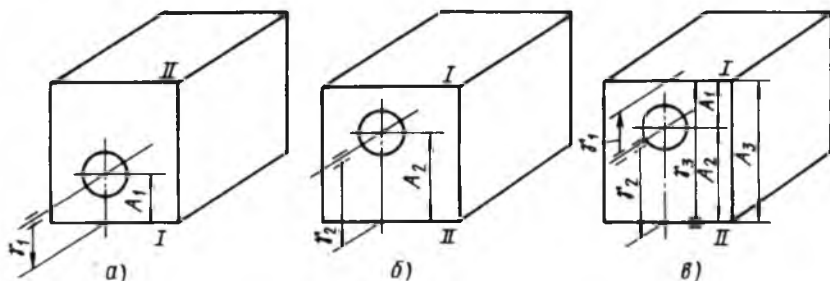


Рис. 1.11.5. Влияние смены технологических баз на точность координирующих размеров:

а – при совпадении технологической базы с конструкторской;
б – при несовпадении технологической базы с конструкторской;
в – размерная цепь и цепь поворотов

возможность перехода к технологической базе отверстия, не совпадающей с конструкторской базой.

Зададимся симметричным расположением поля допуска на поворот поверхности II относительно поверхности I и величиной допуска $T_{\gamma_3} = \pm 0,01/300$ мм. Но так как $T_{\gamma_1} = T_{\gamma_2} + T_{\gamma_3}$, то $T_{\gamma_2} = T_{\gamma_1} - T_{\gamma_3} = (\pm 0,02/300) - (\pm 0,01/300) = \pm 0,01/300$ мм.

Зададимся симметричным расположением ($\Delta_{0A_3} = 0$) поля допуска на размер A_3 , связывающий поверхности конструкторской и технологической баз, и его величиной $T_{A_3} = 0,03$ мм.

Тогда

$$A_2 = A_3 - A_1 = 400 - 100 = 300 \text{ мм};$$

$$\Delta_{0A_2} = \Delta_{0A_3} - \Delta_{0A_1} = 0,0 - 0,2 = -0,2 \text{ мм}.$$

Знак "минус" показывает, что направление координаты середины поля допуска должно быть направлено внутрь размера A_2 (мм):

$$T_{A_2} = T_{A_1} - T_{A_3} = 0,05 - 0,03 = 0,02.$$

Устанавливаем предельные отклонения на размеры, используя полученные данные (мм):

$$A_3 = 400 \pm 0,015; A_2 = 299,8 \pm 0,01.$$

Проверяя, получаем

$$A_1^{\text{нб}} = A_3^{\text{нб}} - A_2^{\text{нм}} = 400,015 - 299,790 = 100,225 \text{ мм};$$

$$A_1^{\text{нм}} = A_3^{\text{нб}} - A_2^{\text{нб}} = 399,985 - 299,810 = 100,175 \text{ мм},$$

что соответствует требуемому $100,2 \pm 0,025$.

Таким образом, чтобы создать возможность перехода на новую технологическую базу, не совпадающую с конструкторской базой, без ущерба для обеспечения требуемого положения поверхности отверстия относительно плоскости / необходимо так построить технологический процесс (включая выбор оборудования), чтобы отклонения на звеньях γ_2 , γ_3 , A_2 и A_3 не выходили за пределы приведенных выше допусков.

1.11.4. СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ СМЕНЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ

Для технологического процесса характерна смена технологических баз. Это может происходить при переходе от одной операции к другой и даже на одной операции при обработке заготовки с переустановкой.

Как известно, при установке заготовки возникает погрешность установки ω_y , которая оказывает непосредственное влияние на погрешность обработки и косвенное – через изменение величины снимаемого припуска.

На погрешность относительного положения поверхностей влияет и погрешность установки обрабатывающего инструмента. Например, при обработке заготовки на одной операции, когда осуществляется несколько технологических переходов, требуется смена инструмента. Тогда на погрешность относительного положения полученных поверхностей при одной и той же установке заготовки окажет влияние погрешность ω_y инструментов, которая, как правило, невысока, так как определяется точностью станка.

Аналогичная картина наблюдается при обработке заготовки на многопозиционных станках, когда заготовка вместе с приспособлением перемещается с одной позиции на другую; ω_y также определяется точностью станка.

Большие значения ω_y при установке заготовки объясняются недостаточной высокой точностью поверхностей заготовки, являющихся техно-

логическими базами, особенно на первой операции, поэтому сокращению ω_y заготовки уделяется большое влияние.

Механизм влияния ω_y на точность обработки при смене технологических баз становится значительно сложнее вследствие наличия размерных связей между размерами, получаемыми на технологических переходах. Знание этого механизма позволяет строить маршрут обработки заготовки, обеспечивающий заданную точность детали.

Смена технологических баз происходит вследствие замены поверхностей заготовки, выступающих в качестве технологических баз, и изменения расположения опорных точек на одних и тех же технологических базах. В последнем случае изменение ω_y обусловлено наличием погрешностей формы поверхностей технологических баз.

Погрешность установки заготовки влияет на точность обработки, вызывая погрешности расстояния и поворота полученных поверхностей. Следует отметить важное обстоятельство: в конструкциях большинства станков отсутствуют механизмы, позволяющие в процессе настройки технологической системы на заданную точность компенсировать погрешность относительных поворотов, как это делается при настройке на заданный размер. Поэтому точность относительных поворотов поверхностей детали достигается методами полной или неполной взаимозаменяемости и зависит от точности технологической системы, что существенно осложняет процесс достижения заданной точности обработки. В результате при смене технологических баз происходит накопление погрешности относительного положения поверхностей детали через суммирование погрешностей установки.

Борьба с накоплениями погрешности относительных поворотов поверхностей ведется, главным образом, посредством использования принципа единства баз.

Реализация принципа единства баз осуществляется применением в качестве комплекта технологических баз на всех операциях одного и того же набора поверхностей. В этом случае все поверхности детали изготавливаются и измеряются от одного комплекта баз.

Строить по такой схеме технологический процесс можно только для деталей, собственные деформации которых, возникающие под влиянием перераспределения внутренних напряжений, настолько малы, что ими можно пренебречь. В противном случае вначале проводят черновую обработку, при которой по мере удаления поверхностных слоев материала происходят интенсивные деформации. К этому нередко добавляют есте-

ственное или искусственное старение, помогающее ускоренному протеканию процесса перераспределения внутренних напряжений. Затем обычно следуют операции по исправлению и окончательной обработке поверхностей, используемых на последующих операциях в качестве технологических баз, и производят окончательную обработку всех или ряда поверхностей детали, к которым предъявляются высокие требования по точности относительного положения.

Нередко детали имеют такую конструкцию, когда от одного комплекта технологических баз физически невозможно изготовить все поверхности детали, например, из-за отсутствия доступа к некоторым из них. Тогда для использования принципа единства баз в качестве технологических баз у детали создают специальные поверхности.

В качестве примера такого решения можно привести широко встречающееся на практике использование центровых гнезд при изготовлении деталей типа валов. Это позволяет, базируя вал на центрах, осуществлять полную обработку всех его поверхностей.

В тех случаях, когда предъявляются высокие требования к точности обработки, приходится по ходу технологического процесса исправлять возникшие погрешности центровых гнезд из-за деформаций, вызванных на предыдущих технологических переходах. Чтобы исключить эти операции, по возможности применяют специальные закаленные пробки. Примером такого решения может служить изготовление шпинделей станков.

Чистовую и отделочную операции опорных шеек и соосных с ними наружных поверхностей шпинделей с осевым отверстием производят на специальных пробках (рис. 1.11.6) или оправках с зацентрированными отверстиями. Пробки вставляют в расточенные с обоих концов цилиндрические или конические отверстия шпинделя, которые служат технологическими базами. Пробки, входящие дополнительным звеном в технологическую размерную цепь при их смене на различных операциях, могут дать существенные ошибки установки, которые перенесутся на положение исполнительной поверхности центрального отверстия относительно поверхности опорных шеек. Чтобы уменьшить влияние ошибки на конечную точность шпинделя, чистовые и отделочные операции обработки наружных поверхностей следует выполнять на одних и тех же пробках, вставленных в шпиндель, без их смены. Это потребует большее количество пробок или оправок, но зато повысит точность обработки.

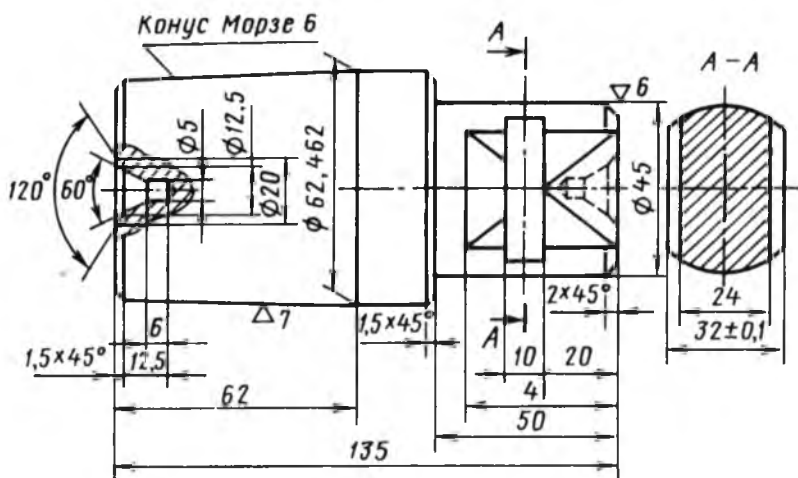


Рис. 1.11.6. Пробка для обработки шпинделя в центрах

Под сменой технологических баз обычно понимают только переход от одних поверхностей к другим. Погрешности же, порождаемые различным относительным положением отдельных участков поверхности или, тем более, заменяющего ее сочетание поверхностей, принято учитывать как одно из слагаемых погрешности установки. Поэтому для наиболее полного использования принципа единства баз необходимо не только стремиться использовать одни и те же поверхности в качестве технологических и измерительных баз на различных операциях, но, что не менее важно, даже одни и те же участки (точки) поверхностей.

С этой целью у приспособлений, используемых на различных операциях, все установочные элементы должны располагаться по единой схеме, на одинаковых расстояниях и быть по возможности одинаковых размеров. Только при соблюдении этих условий можно говорить о соблюдении принципа единства баз, так как, строго говоря, даже и в этом случае с каждой новой установкой происходит смена баз, однако получаемые при этом погрешности обычно настолько малы, что ими пренебрегают.

В п. 1.11.3 показано, что при несовпадении технологических баз с конструкторскими базами допуски на координирующие размеры изготавливаемых поверхностей ужесточаются примерно в 2 раза. В связи с этим, если допуски на относительное положение поверхностей детали высокие, а применение принципа единства баз привело к несовпадению

технологических баз с конструкторскими, вызвавшему ужесточение допусков на изготовление, то может оказаться, что имеющееся оборудование не сможет обеспечить такую точность. В этом случае следует воспользоваться принципами совмещения баз, когда технологические базы совпадают с конструкторскими базами.

На рис. 1.11.7 показаны схемы базирования для получения двух отверстий в корпусной детали. Во втором случае, чтобы изготовить отверстие справа (рис. 1.11.7, в), обеспечив высокую точность размера B , надо заготовку установить по обработанному отверстию слева.

Однако здесь может возникнуть проблема с сокращением погрешности установки, так как ее величина должна быть меньше допуска на расстояние между поверхностями (в рассматриваемом примере – меньше допуска на расстояние между осями отверстий).

Базировать с высокой точностью корпусную деталь по отверстию представляется сложной задачей, требующей изготовления высокоточного и сложного приспособления.

В таких случаях приходится отказываться от применения принципа совмещения баз и возвращаться к принципу единства баз, но с выполнением особых условий.

Особые условия заключаются в том, что эти поверхности должны быть изготовлены с одной установки с помощью сборного или фасонного инструмента.

На рис. 1.11.8 показано, что на точность относительного положения изготовленных поверхностей детали погрешность установки не оказывает влияния. Такой способ обработки позволяет достичь наивысшей точности относительно положения поверхностей.

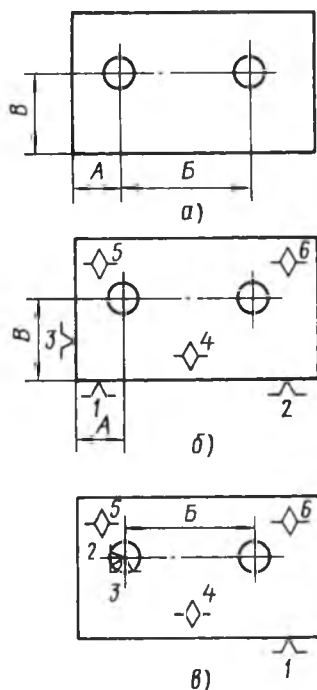


Рис. 1.11.7. Схемы базирования заготовки корпусной детали:
 а – эскиз детали; б – по трем плоскостям; в – по отверстию и плоскостям на второй операции

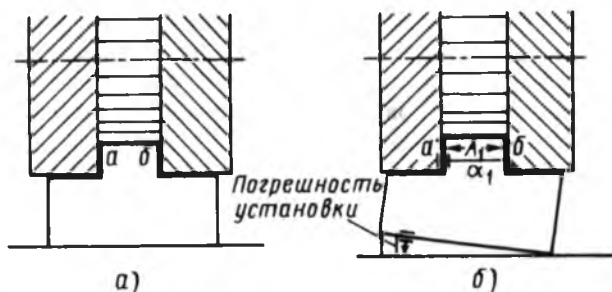


Рис. 1.11.8. Схема обработки детали, показывающая, что погрешность установки не влияет на точность относительного положения поверхностей детали, обработанных с одной установки:

a – погрешность установки отсутствует;

б – наличие погрешности установки

Обработка поверхностей с одной установки заготовки разными инструментами дает худший результат, так как на точности их относительного положения будет сказываться погрешность установки инструментов, связанная с их сменой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В какой последовательности достигается точность размера, формы и шероховатости поверхности?
2. Чем вызвана необходимость разделения механической обработки на предварительную и окончательную?
3. С какой целью осуществляется операция «старение»?
4. Что такое межпереходной размер?
5. Что предназначен компенсировать припуск на обработку поверхности?
6. Напишите формулу расчета величины припуска.
7. Чем вызвана необходимость в пересчете допусков на размеры при несовпадении технологических баз с конструкторскими базами?
8. Как отражается на точности обработки детали смена технологических баз?
9. С какой целью базируют высокоточные валы на пробках?
10. Что надо предпринять, чтобы свести к минимуму погрешность установки?

Глава 1.12

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОКРАЩЕНИЯ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ НА ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Затраты времени на осуществление технологического процесса складываются из затрат времени на все операции и на транспортирование предмета труда от одной технологической системы к другой.

Продолжительность технологического процесса зависит от его структуры, предмета труда и операции.

Структура технологического процесса характеризуется способом осуществления его этапов: последовательным, параллельным, комбинированным. Продолжительность изготовления одного изделия при последовательном изготовлении всех деталей и сборки изделия отличается от продолжительности при их параллельном изготовлении; в последнем случае производительность значительно выше (рис. 1.12.1).

В свою очередь операции каждого технологического процесса сборки или процесса изготовления детали могут быть выполнены тоже последовательно, параллельно или параллельно-последовательно. В соответствии

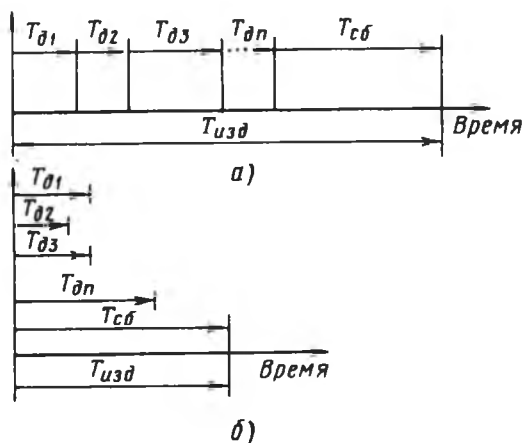


Рис. 1.12.1. Продолжительность технологического процесса изготовления изделия при осуществлении его этапов:

а – последовательно; *б* – параллельно; $T_{\partial i}$ – продолжительность технологического процесса изготовления *i*-й детали;

$T_{сб}$ – продолжительность технологического процесса сборки

с изложенным рассмотрим возможность сокращения затрат времени посредством совершенствования структуры процесса и способы сокращения штучно-калькуляционного времени на операцию.

1.12.1. СОКРАЩЕНИЕ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Рассмотрим этот вопрос на примере изготовления деталей на станках, используя систему понятий и определений, предложенных проф. Д.В. Чарнко [15]. Любой технологический процесс можно выполнять в один или несколько потоков. Осуществление процесса в m потоков означает, что процесс дублируется m раз, что можно представить как работу m поточных линий, на которых параллельно обрабатывают одни и те же заготовки. Рассмотрим структуры однопоточной обработки, поскольку при многопоточной обработке эти структуры дублируются.

Продолжительность операции определяется ее структурой и принятым методом изготовления. Применительно к механической обработке заготовок метод изготовления отражает процесс взаимодействия инструмента с заготовкой и характеризуется типом инструмента и видом относительного движения инструмента и заготовки (например, токарный метод обработки, фрезерный, шлифовальный и т.д.).

Под структурой операции изготовления понимается строение операции, устанавливающее определенную связь и отражающее сочетание технологических переходов, вспомогательных переходов и потоков. При этом структуру операции характеризует оперативное время.

Метод и структура – две стороны одной операции. Методы обработки можно классифицировать по производительности. Например, для заготовки с плоскими поверхностями методы обработки по возрастающей производительности различают следующим образом: строгание → фрезерование → протягивание. При этом, чем производительней метод, тем дороже инструмент.

Следует отметить, что появление нового метода – явление сравнительно редкое, и поэтому проблему повышения производительности процесса главным образом решали совершенствованием структуры операции. Совершенствование процессов по структуре во многих случаях опережало развитие методов обработки. Таким образом, производительность процесса можно увеличить в результате перехода или к более производительному методу, или к более сложной структуре.

Новый, более производительный метод обеспечивает ту же производительность при более простой структуре и, наоборот, при более сложной структуре операции можно достичь высокой производительности, используя менее производительный метод.

Структуру операции различают по классам, группам обработки и их сочетаниям. Структуру операции можно классифицировать по трем классам. Номер класса характеризует степень совмещения технологических переходов. При этом совмещение переходов обеспечивается при одновременной обработке детали несколькими инструментами с одной или нескольких сторон.

Различают *переходы*:

1-й класс – последовательная компоновка операций;

2-й класс – параллельно-последовательная компоновка;

3-й класс – параллельная компоновка (рис. 1.12.2).

При *последовательной компоновке* все технологические переходы выполняют одним или несколькими инструментами последовательно и время обработки представляет собой сумму затрат времени на все технологические и вспомогательные переходы. При *параллельно-последовательной компоновке* технологические переходы выполняют несколькими блоками инструментов. При этом инструменты, расположенные в блоке,

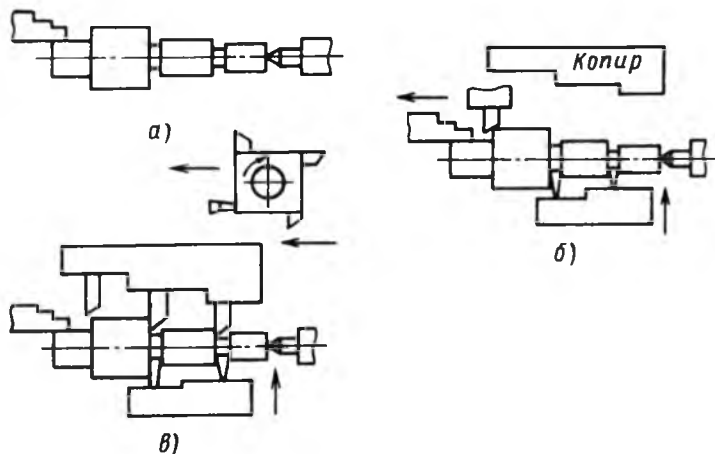


Рис. 1.12.2. Схемы обработки заготовки ступенчатого вала точением:

а – последовательная обработка; б – параллельно-последовательная обработка;
в – параллельная обработка

обрабатывают деталь одновременно, а сами блоки действуют последовательно. При таком способе время на обработку будет равно не сумме всех переходов, а только сумме времени наиболее длительных переходов. При параллельной компоновке технологические переходы выполняются всеми блоками параллельно и время обработки будет равно времени наиболее продолжительного перехода.

Различие компоновок операции по классам находит отражение в формуле оперативного времени. В общем случае для многопоточного процесса $t_{оп} = T_{ц}/m$; здесь m – число потоков.

Цикл представляет собой сумму несовмещенных времен, затрачиваемых на технологические и вспомогательные переходы.

Основное технологическое время операции:

$$\text{– со структурой 1-го класса } t_{от} = t_{от1} + t_{от2} + \dots + t_{отn} = \sum_{i=1}^n t_{отi};$$

$$\text{– со структурой 2-го класса } t_{от} = \sum_{i=1}^k t_{отi \max};$$

$$\text{– со структурой 3-го класса } t_{от} = t_{отi \max},$$

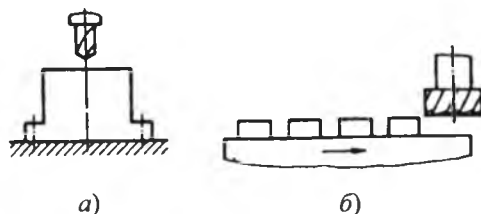
где $t_{отi}$ – основное технологическое время i -го технологического перехода; $t_{отi \max}$ – максимальная продолжительность технологического перехода j -го блока; $t_{отi \max}$ – максимальная продолжительность технологического перехода операции; n – число переходов; k – число блоков.

Сочетание вспомогательных переходов получило название группы обработки. Затраты времени на вспомогательные переходы составляют: $t_{вс} = t_{из} + t_{с.у} + t_x$, где $t_{из}$ – затраты времени на измерение и поднастройку оборудования; $t_{с.у}$ – затраты времени на снятие и установку заготовки; t_x – затраты времени на холостые ходы.

Если рассматривать обработку на станках, на которых размер детали получается автоматически после настройки технологической системы, то все варианты совмещения вспомогательных переходов можно свести к трем группам обработки.

Для первой группы характерно: время измерения совмещено с технологическими переходами; время установки, снятия детали и холостые ходы совмещены частично; используют однопозиционную или многопозиционную обработку (рис. 1.12.3). Вспомогательное время для многопозиционной обработки

$$t_{вс} = a_{с.у} t_{с.у} - \tau_{с.у} + t_x - \tau_x,$$

**Рис. 1.12.3. Схемы обработки:**

а — однопозиционные; *б* — многопозиционные

где a_{cy} — число деталей, устанавливаемых в установочных позициях одного потока; τ_{cy} — время совмещенных установок и снятий детали с другими переходами; τ_x — время совмещенных холостых ходов механизмов.

При многопозиционных процессах возможны несколько установочных позиций, поэтому время установки заготовки и снятия детали совмещают со временем технологического перехода.

Вспомогательное время для однопозиционной обработки

$$t_{вс} = t_{cy} + t_x - \tau_x.$$

При однопозиционных процессах имеется одна установочная позиция, и поэтому $a_{cy} = 1$, $\tau_{cy} = 0$.

Для второй группы характерно, что полностью совмещены по времени все переходы, связанные с измерениями детали, и все переходы по установке и снятию деталей, т.е. вспомогательное время

$$t_{вс} = t_x - \tau_x.$$

Примером обработки второй группы является фрезерование на двухпозиционном столе (рис. 1.12.4). Когда на позиции 2 происходит обработка, на позиции 1 проводят снятие детали и установку новой заготовки.

Для третьей группы характерно совмещение всех вспомогательных переходов с технологическими переходами (рис. 1.12.5). В этом случае оперативное время

$$t_{оп} = \sum_{i=1}^p t_{oi},$$

где p — число несовмещенных переходов; t_{oi} — время несовмещенного i -го технологического перехода.

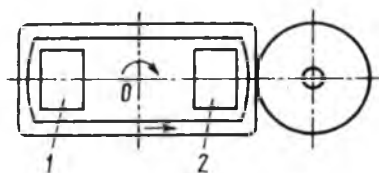


Рис. 1.12.4. Схема фрезерования заготовки на двухпозиционном поворотном столе

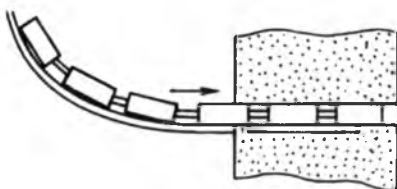


Рис. 1.12.5. Схема обработки заготовки на бесцентровом шлифовальном станке

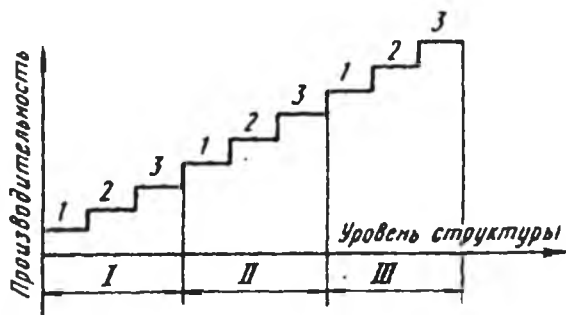


Рис. 1.12.6. Зависимость производительности операции от уровня ее структуры:
1, 2, 3 – группы обработки; I, II, III – классы обработки

Можно обеспечить различную производительность процесса, если сочетать обработку по классам и группам. Чем выше производительность процесса, тем сложнее его структура. Пример зависимости показывает характер изменения производительности от уровня сложности структуры операции (рис. 1.12.6).

1.12.2. СОКРАЩЕНИЕ ЗАТРАТ ПОДГОТОВИТЕЛЬНО-ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Доля подготовительно-заключительного времени $T_{пз}$, приходящаяся на изготовление одного изделия $t = T_{пз}/n$, зависит от числа n изделий в партии. В условиях крупносерийного и массового производства, когда n очень велико, доля t становится исчезающе малой величиной и ее сокращение практически не влияет на повышение производительности процесса.

В условиях единичного и мелкосерийного производств доля подготовительно-заключительного времени доминирует, достигая порой 70...80 % от $t_{шт.к.}$. Поэтому в этом случае сокращение величины $T_{п.з}$ приобретает особую актуальность.

Подготовительно-заключительное время включает затраты времени: на получение и ознакомление рабочего с задачей, которую ему необходимо выполнить – t_4 ; на получение и установку на станке режущего инструмента – $t_и$, и приспособлений, служащих для установки и закрепления обрабатываемых объектов – $t_о$; на статическую настройку размерных и кинематических цепей технологической системы – t_c :

$$T_{п.з} = t_4 + t_и + t_о + t_c.$$

Сокращение $t_и$ осуществляется с помощью быстросменных приспособлений, например, для смены сверл, разверток, блоков с заранее установленными режущими инструментами и т.п.

Примером может служить сменная револьверная головка с державками и настроенным режущим инструментом для обработки одной или нескольких, близких по назначению, а иногда и различных, деталей. Сменные головки позволяют быстро осуществить перенастройку высокопроизводительного станка с обработки одной детали на другую.

Для сокращения времени t_c , затрачиваемого на статическую настройку размерных цепей технологической системы, используются различные средства, служащие одновременно и для увеличения точности, в виде встроенных индикаторов, линеек, габаритов и т.д.

Одним из радикальных средств, служащих для этой же цели, являются станки с программным управлением. Станки с ЧПУ могут быть достаточно быстро перенастроены с обработки одной детали на другую путем смены программы. Программа позволяет обеспечить необходимые начальные перемещения узлов станка, их рабочие и холостые движения. Однако при программированном управлении за наладчиком остается настройка размерных цепей технологической системы на требуемую точность обрабатываемой детали. Это обстоятельство существенно сказывается на производительности обработки.

Стремление изготовить всю деталь на одном-двух станках сталкивается с проблемой сокращения затрат времени на настройку станка на заданную точность при обработке каждой поверхности. Большие затраты времени имеют место при разработке управляющих программ на изготовление сложных деталей. Поэтому эту работу целесообразно осуществлять вне станка, что сокращает цикл обработки заготовки, но при этом

отладка управляющей программы осуществляется рабочим и требует больших затрат времени.

При изготовлении детали с большим числом ответственных поверхностей время на настройку технологической системы резко возрастает.

Другим путем сокращения подготовительно-заключительного времени, приходящегося на единицу изделия, является увеличение количества изделий в партии, обрабатываемой при одной настройке размерных и кинематических цепей технологической системы.

Увеличение количества изделий может быть достигнуто двумя путями:

1) увеличением одинаковых изделий в партии, как это имеет место, например, в массовом производстве, когда на ряде настроенных технологических систем производится обработка одних и тех же изделий иногда в течение нескольких лет. В таких условиях учет $T_{п.з}$ вообще теряет смысл, так как это время становится исчезающе малой величиной;

2) увеличением количества деталей за счет обработки различных деталей, близких по служебному назначению и по конструкции, размерам, материалу, техническим условиям и т.д.

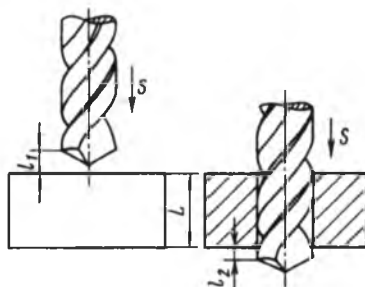
Обработка деталей группы во втором случае требует незначительной переналадки технологической системы при переходе от обработки одной детали к другой. Действительно, если, например, на револьверном станке обрабатывают валы одного диаметра, но различной длины, то для перехода на обработку более длинного вала необходимо только переставить упоры ограничения длины хода револьверной головки. Следовательно, обработка группы такого типа деталей как бы увеличивает количество деталей, обрабатываемых с одной настройкой или при небольшой перенастройке технологической системы, что, в итоге, привело к появлению групповой технологии. Для ее реализации используются различного рода универсальные приспособления, позволяющие обрабатывать группу деталей с быстрой перенастройкой.

Для тех же целей используются различного рода унифицированные наладки, позволяющие осуществлять быстрый переход с обработки заготовки одной детали на обработку заготовки другой детали.

1.12.3. СОКРАЩЕНИЕ ЗАТРАТ ШТУЧНОГО ВРЕМЕНИ

Основную долю времени $t_{шт}$, как правило, составляют основное технологическое $t_{от}$ и вспомогательное $t_{вс}$. Время любого процесса зависит от пройденного пути и скорости движения, поэтому в основе всех способов сокращения затрат $t_{от}$ и $t_{вс}$ лежит сокращение пути и повышение скорости движения.

Рис. 1.12.7. Схема определения пути движения сверла с рабочей подачей



Сокращение основного технологического времени осуществляется путем сокращения пути относительного движения инструмента и предмета труда и посредством интенсификации непосредственно рабочего процесса.

Сокращение пути относительного движения режущего инструмента и обрабатываемой заготовки может осуществляться за счет уменьшения величины пути на входе l_1 и выходе l_2 режущего инструмента.

В качестве примера на рис. 1.12.7 показаны размеры l_1 и l_2 при обработке отверстия спиральным сверлом. Режущий инструмент проходит расстояния l_1 и l_2 с рабочей подачей S , поэтому все мероприятия, позволяющие уменьшить эти размеры, способствуют сокращению машинного времени. Примерами могут служить два способа уменьшения величины пути при обработке деталей торцевой фрезой, а на рис. 1.12.8, а показано уменьшение l_1 путем увеличения диаметра фрезы, а на рис. 1.12.8, б – за счет установки центра фрезы по линии симметрии детали (в обоих случаях $l_1' < l_2'$).

Обработка нескольких последовательно установленных деталей также способствует сокращению пути входа и выхода инструмента, проходящегося на одну деталь, особенно если детали следуют друг за другом без зазора, что приобретает наибольшее значение при переходе к обработке коротких поверхностей деталей.

Наибольший эффект получается при сокращении длины пути рабочего хода инструмента путем обработки каждой из поверхностей одновременно несколькими инструментами. Наиболее часто этот способ находит применение на многорезцовых токарных и револьверных станках и автоматах. Как видно из схемы на рис. 1.12.9, увеличение количества резцов позволяет сократить длину рабочего хода пропорционально их количеству. В соответствии с этим машинное время уменьшается также в надлежащее число раз:

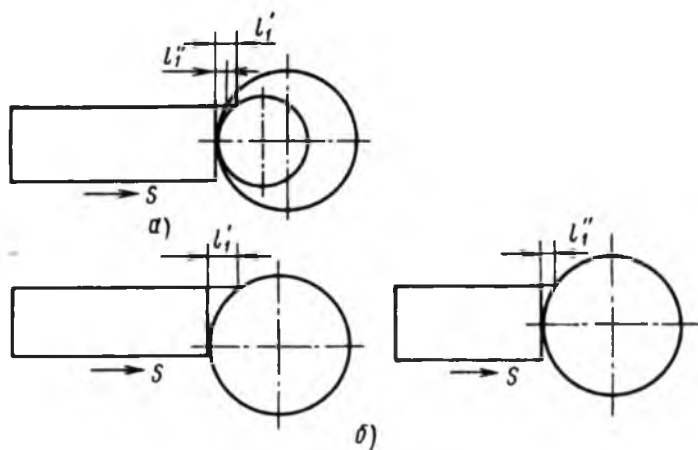


Рис. 1.12.8. Два способа сокращения l_1 (см. рис. 1.12.7) при фрезеровании

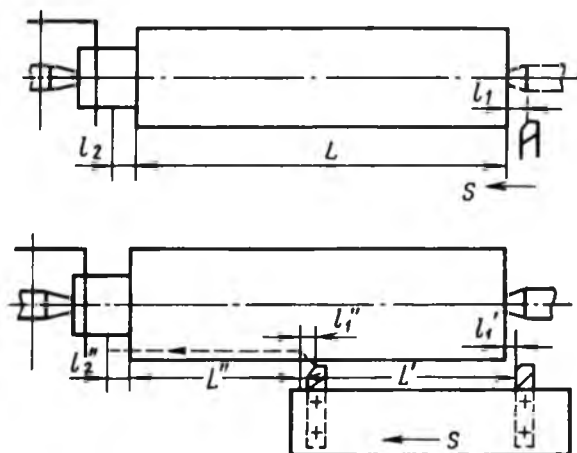


Рис. 1.12.9. Схемы обработки одной поверхности детали одним и двумя резцами

$$T_{m1} = \frac{(L + l_1 + l_2)i}{nS}; \quad T_{m2} = \frac{(L + l_1 + l_2)i}{2nS}; \quad T_{mm} = \frac{(L + l_1 + l_2)i}{mnS},$$

где m – число резцов; i – число проходов.

В результате обработки одной поверхности одновременно несколькими инструментами в местах стыка участков поверхностей, полученных при обработке каждым из инструментов, всегда остается ступень из-за различной динамической погрешности в каждой из размерных цепей, с помощью которых образуется каждый из этих участков, обрабатываемых отдельным инструментом. Если продолжать увеличивать количество одновременно работающих резцов или увеличивать режущую кромку резца до тех пор, пока она не станет равной длине обрабатываемой поверхности с прибавкой на колебание размера длины, то длину рабочего хода инструмента можно уменьшить до размера припуска на обработку, с добавлением некоторой величины на вход инструмента, т.е. совершить переход к наиболее производительному способу сокращения машинного времени – к обработке способом врезания. К сожалению, современные станки, инструменты и многие детали не обладают еще достаточной жесткостью, чтобы можно было полностью использовать основные преимущества обработки способом врезания, т.е. с подачей в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности.

Интенсификация рабочего процесса является одним из основных способов сокращения машинного времени, так как позволяет увеличивать скорости резания и подачу инструмента. Однако это увеличение ограничивается допустимой силой резания, которая, в свою очередь, определяется допустимыми упругими перемещениями и прочностью наиболее слабого звена технологической системы.

Рост режимов обработки, особенно скорости резания, достигается путем использования новых видов материала обрабатывающего инструмента, а также применением высокопроизводительного оборудования.

Область применения высокоскоростной обработки все больше расширяется, охватывая большой круг операций механической обработки. Выбор режимов обработки тесно связан с требуемой точностью обрабатываемой детали. Упругие перемещения технологической системы, порождающие в значительной части погрешности обработки, и особенно недостаточная жесткость обрабатываемых деталей, лимитируют допускаемую при обработке силу резания, а тем самым и подачу при прочих равных условиях. Скорость резания лимитируется размерной стойкостью режущего инструмента и количеством образующего тепла, порождающего температурные деформации технологической системы.

Таким образом, установление режимов обработки должно основываться исходя из экономичного достижения требуемой точности детали, а в ряде случаев и качества поверхностного слоя.

Сокращение вспомогательного времени. Доля вспомогательного времени в штучном и его абсолютная величина при обработке деталей на некоторых видах оборудования достигает значительных величин, превосходящих, довольно часто, в несколько раз основное технологическое время.

Действительно, при незначительной доле в штучном времени t_{0T} его уменьшение не дает значительного эффекта. Отсюда следует, что сокращение вспомогательного времени является во многих случаях одним из решающих факторов дальнейшего увеличения производительности труда.

Непосредственное сокращение вспомогательного времени осуществляется за счет следующих мероприятий:

- 1) уменьшением времени, расходуемого за замену одних обработанных деталей другими: путем использования методов взаимозаменяемости и определенности базирования для достижения требуемой точности установки при смене обрабатываемых деталей, путем сокращения времени закрепления при смене обрабатываемых деталей, автоматизации смены обрабатываемых деталей и др.;

- 2) уменьшением времени, затрачиваемого на управление оборудованием и приспособлениями, путем упрощения управления, его механизации и автоматизации;

- 3) уменьшением времени, затрачиваемого на контроль за ходом выполнения технологического процесса, путем правильного выбора методов средств измерения, механизации и автоматизации контроля;

- 4) комплексной автоматизацией технологического процесса.

Смена обрабатываемых деталей и их установка с требуемой точностью на станке занимает, как известно, много времени. Например, установка и закрепление тяжелых крупногабаритных деталей иногда занимают до 10 ч и более. Использование для этой цели метода взаимозаменяемости путем применения приспособлений или универсальных средств, позволяющих при смене обработанной детали сразу установить ее с требуемой точностью, резко сокращает затраты времени. Действительно, если сравнить, например, затраты времени на смену деталей в четырехкулачковом или трехкулачковом самоцентрирующем патронах, то окажется, что в первом случае в среднем затрачивается в 2 – 10 раз больше времени из-за необходимости многократных проверок и внесения необходимых поправок.

Применение при установке и закреплении заготовок деталей стандартизованных и нормализованных средств в виде крепежных болтов, подкладок, накладных планок и т.п. является одним из наиболее простых средств сокращения затрат вспомогательного времени.

Сокращение количества типоразмеров крепежных средств, замена круглых шайб в винтовых зажимах разрезными сокращает время, необходимое для наворачивания и свертывания гаек. Введение пружин, поддерживающих прижимные планки, служат той же цели, а также замена винтовых зажимов эксцентриковыми и плунжерными.

Сокращение типоразмеров крепежных средств и особенно количества независимых зажимов, т.е. концентрация управления зажимами приспособления в одной точке, является наиболее эффективным средством сокращения времени закрепления деталей.

Широкого внедрения заслуживают универсальные приводы, механизмирующие ручной зажим. Примерами таких приводов являются привод с пневмоцилиндром или пневмокамерой. Такого типа приводы устанавливаются на столах станков и соединяются рычажной системой с приспособлениями, служащими для установки и закрепления деталей. С помощью этих приводов удается механизировать закрепление деталей, повысить точность установки и сократить затраты вспомогательного времени даже при обработке деталей в небольших количествах. Широкое применение пневматические зажимы находят в приспособлениях для обработки деталей, изготавливаемых в значительных количествах.

Сокращение времени, затрачиваемого на управление станком, осуществляется концентрацией управления в одном месте, его механизацией и автоматизацией. Введение механизмов ускоренных перемещений режущих инструментов в рабочее и исходное положения, приспособлений и механизмов для быстрой смены режущих инструментов является основными мероприятиями по сокращению затрат вспомогательного времени.

Сокращение оперативного времени осуществляется, главным образом, за счет совмещения переходов и управлением процессом обработки. Часто у детали требуется обработать несколько одинаковых или различных поверхностей, расположенных на одной или нескольких сторонах детали.

Параллельная или параллельно-последовательная обработка нескольких поверхностей позволяет посредством совмещения переходов одновременно сократить $t_{0\tau}$ и $t_{вс}$.

При одновременной обработке всех поверхностей детали основное технологическое время $t_{0\tau}$ будет равно времени, затрачиваемому на выполнение наиболее продолжительного перехода, т.е.

$$t'_{0\tau} = t_{0\tau \max},$$

если

$$t_{0\tau 1} \leq t_{0\tau \max}; \quad t_{0\tau 2} \leq t_{0\tau \max}; \quad t_{0\tau i} \leq t_{0\tau \max},$$

где $t'_{0\tau i}$ — основное технологическое время i -го технологического перехода.

Из примера следует, что технология изготовления деталей предъявляет к их конструкции свои требования, удовлетворение которых позволяет использовать наиболее производительные способы обработки. В тех случаях, когда из-за конструктивных особенностей детали, вследствие, например, расположения осей отверстий на близких расстояниях или большой разности диаметров отверстий, или расположения поверхностей на разных уровнях и т.д., исключается возможность одновременной обработки всех поверхностей, приходится использовать комбинированную обработку.

Совмещение переходов может осуществляться при обработке различных поверхностей одной детали инструментами как одинаковых типов и размеров, так и разных.

Большой эффект дает совмещение переходов, связанных со сменой обрабатываемой детали, с основными технологическими переходами. Наиболее просто оно осуществляется с помощью так называемой "маятниковой" обработки. Сущность ее сводится к тому, что во время обработки одной детали, закрепленной в приспособлении, установленном на одном конце стола станка (рис. 1.12.10), осуществляется смена другой, ранее обработанной детали, в приспособлении, установленном на втором конце стола. После окончания обработки детали A стол быстро перемещается для обработки детали B . Пока обрабатывается деталь B , осуществляется смена детали A ; цикл обработки повторяется до тех пор, пока все детали партии не будут обработаны.

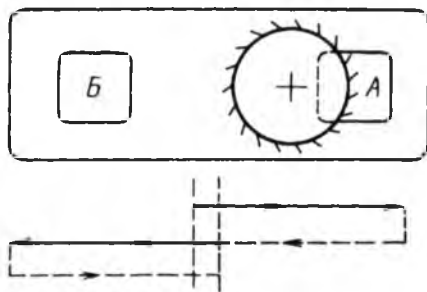


Рис. 1.12.10. Схема "маятниковой" обработки

Вместо "маятниковой" обработки для той же цели можно использовать обработку с поворотным столом (рис. 1.12.11), при которой после обработки каждой детали и ее ускоренного отвода стол поворачивается на 180° для обработки следующей детали, установленной во время обработки предыдущей.

Совмещение переходов, связанных с относительным перемещением режущего инструмента и детали, обычно возможно при многоинструментной обработке, особенно когда инструменты расположены на различных суппортах, головке и т.д. Так, например, при обработке деталей на revolverных станках или одношпиндельных автоматах, во время работы инструмента, установленного на revolverной головке, осуществляется быстрый подвод в рабочее положение режущих инструментов, закрепленных на поперечном суппорте. Во время работы последних осуществляется быстрый отвод головки, ее поворот для смены инструмента и быстрый его подвод в рабочее положение и т.д.

Совмещение переходов, связанных с измерением обрабатываемых деталей, осуществляется обычно или с помощью приспособлений и измерительных устройств, позволяющих осуществлять измерение в процессе обработки (рис. 1.12.12), или путем использования систем активного контроля. Системы активного контроля позволяют также совмещать переходы, связанные с поднастройкой технологической системы, с переходами основного технологического времени, поскольку поднастройка осуществляется во время обработки. Эту же задачу можно в ряде случаев решить и с помощью систем управления упругими перемещениями.

Сокращение оперативного времени путем управления процессом обработки происходит за счет сокращения числа рабочих ходов с одновременным повышением режимов обработки. Прежде чем начать обработку, рабочий должен установить режим обработки. Чтобы правильно назначить режимы резания, необходимо иметь информацию об условиях обработки. Рабочий, установив заготовку на станок, приблизительно знает ее размеры, твердость материала, состояние режущего инструмента,

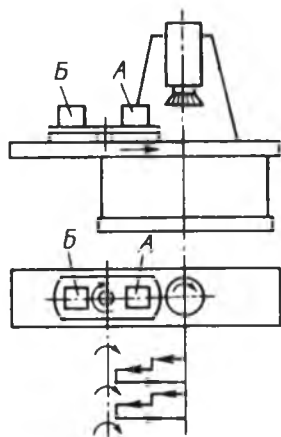


Рис. 1.12.11. Схема обработки деталей с помощью поворотного стола

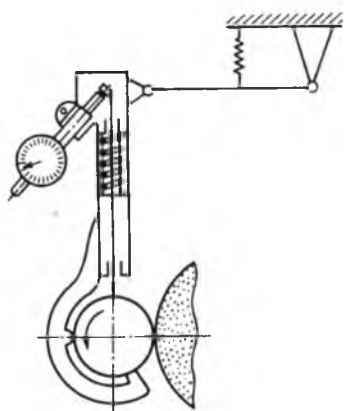


Рис. 1.12.12. Схема прибора, контролирующего отклонения диаметра в процессе обработки

степень его затупления, состояние технологической системы, ее свойства. В некоторых случаях рабочий измеряет поступившую заготовку (обычно в одном-двух сечениях). Этими данными получение информации о характеристиках заготовки, состоянии технологической системы и условиях обработки, как правило, исчерпывается. Далее рабочий методом проб, пользуясь соответствующими рекомендациями и собственным опытом, устанавливает режимы резания и начинает обработку, причем режимы резания он устанавливает такими, чтобы не поломать станок или инструмент и получить годную деталь. Однако, не зная точно величину снимаемого припуска, фактическую

твердость материала заготовки, состояние режущего инструмента и др., он стремится устанавливать такие режимы, при которых даже в случае наличия у одной заготовки максимального припуска, наибольшей твердости материала и при затупленном инструменте деталь своими размерами не выйдет за пределы допуска, а в технологической системе не произойдет поломок.

Таким образом, первая трудность, с которой приходится сталкиваться при выборе режимов резания, – это отсутствие необходимой информации о состоянии технологической системы и ходе технологического процесса. Так как рабочий или технолог не имеют достаточно точной информации о состоянии технологической системы, то режимы, которые будут выбраны, окажутся заведомо занижены по сравнению с возможными.

Например, пусть при назначении режимов резания приняли в качестве ограничения силу резания P , не превышающую максимально допустимое значение $P'_{\max}$ из расчета прочности технологической системы, которое не соответствует действительно максимально допустимой вели-

чине $P'_{\max}$, так как прочность технологической системы оценивается приблизительно. Если принять коэффициент запаса прочности технологической системы 1,5, то и тогда получим, что $P'_{\max} = P_{\max}/1,5$.

Однако режимы резания выбирают такими, чтобы обеспечить неравенство $P < P'_{\max}$. Объясняется это тем, что в действительности прочность технологической системы изменяется во времени и значение фактической силы резания не должно превысить значение $P'_{\max}$, соответствующее минимально возможному значению прочности технологической системы. В итоге расчетное значение силы резания P окажется значительно меньше $P'_{\max}$.

Аналогичная картина наблюдается, если ограничениями являются жесткость технологической системы, виброустойчивость или какое-либо другое ее свойство. Иными словами, номинальные значения режимов резания оказываются значительно ниже возможных из-за незнания фактического состояния технологической системы в каждый момент времени.

Отсутствие информации о фактическом состоянии технологической системы и прогнозов об изменении состояния в момент настройки приводит к занижению назначаемых режимов обработки и, как следствие, к потере производительности. Кроме того, если по мере изменения состояния технологической системы и действующих факторов не вносить поправки в настройку, то в какой-то момент времени погрешность обработки может выйти за границы поля допуска. Примером изложенного может служить изменение жесткости технологической системы на протяжении рабочего хода при обработке детали низкой жесткости.

Одновременно меняются в той или иной степени и все действующие факторы, как порождаемые процессом резания, так и факторы окружающей среды. Так, например, нагрев станка непрерывно изменяется в течение рабочего дня (если станок стоит около окна, то в течение рабочего дня на его нагрев оказывает большое влияние изменение температуры среды под действием солнечных лучей; станок нагревается и от различного рода приборов отопления и др.; источником тепла служит также сам процесс резания). Многочисленные исследования показали, что в результате действия окружающей среды температура станка может изменяться на 10 °C и более.

Широко изменяется во времени и силовой фактор. Так, например, сила резания изменяется как по длине прохода, так и от заготовки к заготовке. Наиболее важными причинами, порождающими эти изменения, являются колебание припуска и твердости материала заготовки, затупление режущего инструмента.

Если строго учитывать все изложенное, то при настройке технологической системы назначать режимы обработки следует исходя из возможности наилучшего сочетания всех условий. Однако вероятность такого сочетания невелика. Например, если с заготовки снимается максимальный припуск, то твердость ее материала обычно бывает не наибольшей. Однако и эта заготовка обрабатывается на тех же режимах, в то время как их можно было бы повысить. Поэтому на практике режимы резания устанавливают выше тех, которые соответствуют неблагоприятному сочетанию всех факторов. Но повышение режимов резания чревато нежелательными последствиями. Например, чем выше режимы, тем больше вероятность перегрузки технологической системы, поломки ее слабого звена, выхода погрешности обработки за пределы допуска и т.д.

В условиях массового и крупносерийного производства по мере накопления статистического материала о процессе постепенно находят режимы, которые обеспечивают более высокую производительность при допустимом числе поломок, т.е. устанавливают экономически обоснованный процент риска поломок. В мелкосерийном и единичном производстве, особенно при его автоматизации, потери производительности из-за занижения режимов резания больше по сравнению с крупносерийным производством, так как указанная статистика практически отсутствует. Если рабочий достаточно опытный, то он будет стремиться в некоторой степени управлять процессом, регулируя режимы резания. Но этому препятствует отсутствие на станках приборов, контролирующих ход технологического процесса, несовершенство механизмов, с помощью которых устанавливаются режимы резания, а также отсутствие на многих станках бесступенчато регулируемых приводов главного движения и подачи. Кроме того, препятствием служит недостаточная реакция рабочего, его утомляемость. Если рабочий не имеет высокой квалификации, то, как правило, обработка производится на постоянных режимах.

Кроме случайных факторов действуют и систематические, зависящие от конструкции заготовки и детали. В качестве примера можно привести токарную обработку ступенчатого вала из поковки.

Режимы на обработку вала назначают исходя из максимального припуска и твердости материала заготовки и допустимой силы резания. По этим данным определяют продольную подачу. На графиках (рис. 1.12.13) показано, как в процессе обработки с $S_1 = \text{const}$ изменяется нагрузка в технологической системе, наглядно показывающая, что станок в процессе обработки полностью не загружен.

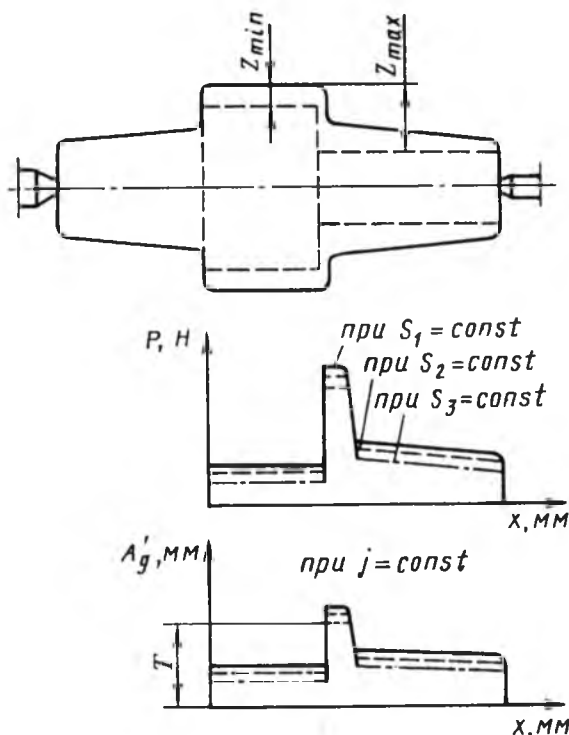


Рис. 1.12.13. Изменение величины силы резания P и упругого перемещения A_d в течение рабочего хода

Здесь следует отметить, что в рассмотренном примере значение продольной подачи устанавливалось при наличии информации о максимальной величине припуска $Z_{\max}$. В реальных условиях $Z_{\max}$ не известен, так как значение припуска – величина случайная. Но поскольку величина $Z_{\max}$ точно не известна, то подачу S_2 , во избежание перегрузки и поломки звеньев технологической системы, назначают из расчета припуска $Z'_{\max}$, который обычно больше действительного $Z_{\max}$. В результате, как следует из графика, станок оказывается загружен еще меньше, а машинное время увеличится еще больше. Если обрабатывается партия заготовок, то припуск $Z_{\max}$ колеблется от заготовки к заготовке.

Например, пусть рассеяние максимального припуска в партии подчиняется нормальному закону распределения, тогда колебание величины

продольной подачи должно подчиняться этому же закону; наибольшему значению $Z_{\max}$ тогда будет соответствовать наименьшее значение продольной подачи. Поскольку в реальных условиях максимальный припуск на каждой заготовке не контролируется, то обработка всей партии заготовок должна производиться с подачей из расчета наибольшего $Z_{\max}$ в партии, т.е. $S_{\min}$, что означает, что в 99,73 % случаев обработка будет производиться с заниженной подачей. Но так как действительное наибольшее значение $Z_{\max}$ не известно, то выбранная подача будет еще меньше.

Большое влияние на выбор режимов резания оказывает конфигурация обрабатываемой детали. Так, при разрезке дисковой пилой, фрезеровании и шлифовании деталей с плоскими поверхностями на выбор скорости перемещения стола оказывает большое влияние ширина обрабатываемой поверхности, поскольку она включается в формулу силы резания. Например, при фрезеровании приближенно можно считать, что сила резания P пропорциональна ширине фрезерования

$$P \approx kB,$$

где B – ширина фрезерования; $k = C_p t^{x_p} HB^{n_p}$; C_p – постоянный коэффициент, учитывающий условия обработки; HB – твердость материала заготовки; x_p , n_p – показатели степени.

Как следует из рис. 1.12.14, на котором показаны детали разной формы, встречающиеся на практике, а нанесенная штриховка указывает обрабатываемые поверхности, ширина фрезерования (шлифования) может значительно изменяться из-за конфигурации обрабатываемой детали, а при торцовой обработке фрезерованием (шлифованием) ширина еще меняется на входе и выходе фрезы (шлифованного круга). В этих случаях скорость стола приходится назначать из расчета максимальной ширины фрезерования (шлифования). Следовательно, при обработке участка детали с меньшей шириной будет иметь место потеря производительности обработки.

Если строго учитывать характер заготовки, переменную ширину обработки детали, возможные максимальные значения припуска и твердости материала заготовки, то выбранная подача окажется настолько низкой, что в большинстве случаев обработка деталей на таком режиме будет крайне непроизводительна. Поэтому подачу завышают из предположения, что при обработке наибольшей ширины детали величины припуска и твердости материала заготовки в одной ее точке не окажутся максимальными; на практике S назначают больше на основании опыта и знаний условий обработки. Чем больше подача, тем более вероятна поломка

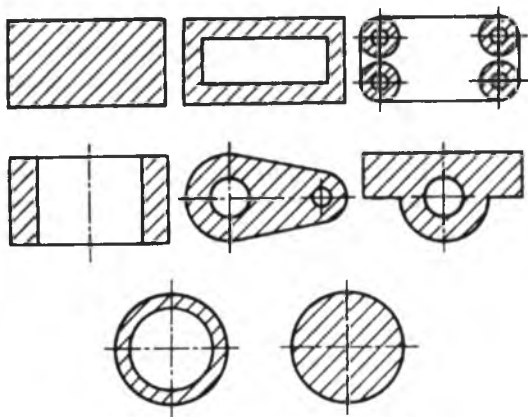


Рис. 1.12.14. Примеры поверхностей деталей, обрабатываемых на фрезерных и шлифовальных станках

слабого звена технологической системы. В условиях массового и крупносерийного производства по мере накопления статистического материала постепенно находят значение S , которое обеспечивает более высокую производительность.

В мелкосерийном и индивидуальном производстве потери производительности в условиях автоматизированного производства больше, так как указанная выше статистика отсутствует. При работе на станке с участием рабочего эти потери несколько ниже, поскольку рабочий в некоторой степени может учитывать систематические изменения припуска (например, изменять подачу при обработке ступеней валика с разной глубиной резания). Однако и в этом случае, поскольку на станке отсутствуют приборы, показывающие величину действующей силы резания, рабочий, боясь перегрузки технологической системы и поломки ее звеньев, обработку ведет с заниженной подачей, и чем ниже квалификация рабочего, тем больше потери производительности.

Обработка на станках с программным управлением позволяет учитывать систематическое изменение припуска и конфигурацию детали. В этом случае остается неучтенным случайное колебание припуска и твердости материала заготовки. Следовательно, при наименьших значениях припуска и твердости скорость резания окажется заниженной.

Колебание припуска по длине заготовки в ряде случаев приводит к тому, что на отдельных участках детали происходит обработка "воздуха",

т.е. режущий инструмент в этих местах не касается заготовки, а продольная подача остается постоянной, выбранной из расчета наибольшей нагрузки. Это явление наблюдается очень часто на шлифовальных операциях, где колебания припуска очень часто оказываются значительно больше глубины резания на проход, определяемой сотыми долями миллиметра. На рис. 1.12.15 показаны различные случаи потери производительности, имеющие место на практике. Например, при шлифовании шлицев из-за неправильной установки шлицевого вала в центры станка (см. рис. 1.12.15, б), а также вследствие неправильного центрирования обрабатываемая поверхность может оказаться расположенной под углом к направлению стола. При обычной обработке с постоянной подачей это приводит к значительным потерям производительности, так как не полностью используются возможности технологической системы.

Наглядным примером изложенного может служить обработка детали на плоскошлифовальном станке (см. рис. 1.12.15, в). На протяжении почти всей длины детали съема металла на первых проходах не будет из-за погрешности формы, а стол этот участок проходит с постоянной подачей, в то время как участок можно проходить на увеличенной рабочей подаче.

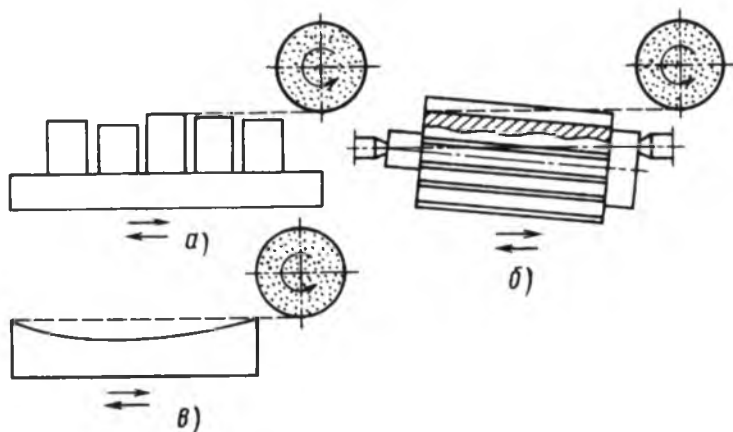


Рис. 1.12.15. Схемы обработки для разного характера неравномерности припуска:

а – при обработке группы деталей; *б* – при шлифовании шлицев;
в – при плоском шлифовании

Большое влияние на производительность обработки оказывает режущая способность инструмента. Так, например, остро заточенный резец или фреза позволяют в значительной степени повысить режимы обработки, сохраняя то же значение силы резания, что и при затупившемся инструменте. Изготавливаемый режущий инструмент всегда имеет в партии разброс степени режущей способности. Поэтому при назначении режимов резания с тем, чтобы не было перегрузки и поломки, ориентируются на инструмент с худшей режущей способностью. Это приводит к тому, что обработка деталей более острым инструментом, как правило, осуществляется на заниженных режимах.

В случае многопроходной обработки шлифованием режим обработки ограничивается способностью шлифовального круга снимать в единицу времени с обрабатываемой детали определенный объем материала. В свою очередь, при заданной окружной скорости v_d детали и круга v_k и скорости стола объем снимаемого материала лимитирует величину подачи на один двойной ход стола. Вследствие постепенного создания размера динамической настройки из-за высокой податливости технологической системы при малых величинах нагрузки за каждый двойной ход происходит увеличение объема материала, подлежащего удалению. Действительно, согласно рис. 1.12.16, при подаче $S = 0,02$ мм на один двойной ход шлифовальный круг за первый двойной ход снимает фактически только 0,002 мм вместо 0,02 мм. При втором двойном ходе шлифовальный круг должен снять 0,02 мм плюс оставшийся от первого двойного хода слой материала толщиной 0,018 мм; итого – 0,038 мм. На графике видно, что натяг A_d , требуемый для снятия 0,02 мм за двойной ход стола, создается только на десятом двойном ходе, после чего шлифовальный круг начинает за каждый двойной ход снимать слой материала, подаваемый на один двойной ход стола до 0,04 мм; в таком случае за 2 – 3 двойных хода объем снимаемого материала достигнет критической величины. В результате на последующих ходах шлифовальный круг будет не в состоянии снимать объем подводимого к нему материала, накопившегося из-за упругих деформаций технологической системы. Таким образом, круг будет лишен возможности срезать подводимый слой материала, процесс резания прекратится и появятся вибрации; поэтому увеличивать подачу выше допустимой нельзя. В то же время, поскольку натяг в технологической системе создается постепенно за несколько проходов, то тем самым не используется полностью режущая способность круга, а это приводит к потере производительности обработки.

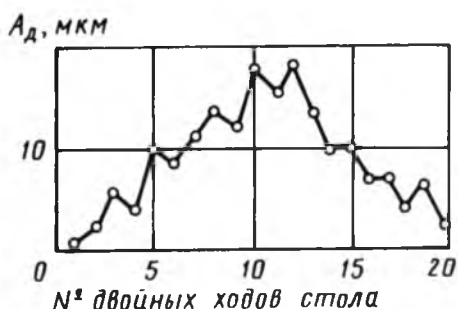


Рис. 1.12.16. График фактической величины съема припуска в зависимости от числа двойных ходов и натяга A_d ($v_d = 53$ мм/мин, $S = 28$ мм/об, $v_k = 28$ м/с, сталь 50, закаленная)

Оснащение станков системами адаптивного управления (САУ) позволяет учитывать действие перечисленных систематических и случайных факторов и тем самым повысить производительность обработки за счет существенного сокращения оперативного времени.

В основу работы САУ положена стабилизация силовой нагрузки. Для управления силовой нагрузкой в качестве источников информации используют практически те же величины, что и при управлении упругими перемещениями; главным требованием является наличие однозначной зависимости между контролируемой величиной и тем параметром силовой нагрузки, который поддерживают на заданном уровне. Внесение поправки осуществляется теми же способами, что и при управлении упругими перемещениями.

Управление силовой нагрузкой не только повышает качество поверхностного слоя детали, но и предотвращает перегрузку и, тем самым, поломку слабого звена технологической системы, а также позволяет загружать станок на полную мощность, увеличивать долговечность работы станка за счет обработки с постоянной нагрузкой.

Приобретенная технологической системой способность предотвращать перегрузку, вести обработку с постоянной силой резания повышает надежность работы станков и, что особенно важно, надежность автоматов и автоматических линий. Обработка деталей на автоматических линиях осуществляется большим количеством инструмента; при этом применяются одноинструментные и многоинструментные наладки. Выход из строя одного инструмента влечет за собой остановку минимум одного

станка, а в некоторых случаях участка или всех линий. Эта проблема во многом может быть решена применением систем адаптивного управления.

Сокращение оперативного времени путем совместной обработки деталей. Большое влияние на повышение производительности труда оказывает совместная обработка деталей. При совместной обработке детали могут устанавливаться и обрабатываться последовательно (рис. 1.12.17, а); параллельно (рис. 1.12.17, б); комбинированно (рис. 1.12.17, в). Наибольший эффект с точки зрения сокращения $t_{оп}$ дает параллельная обработка.

Для увеличения производительности труда при обработке деталей в небольших количествах используются одновременная обработка различных деталей, обработка деталей с "перекладкой" или их комбинация.

При увеличении количества деталей, подлежащих обработке, становится экономичным одновременное совмещение переходов и совместной обработки деталей. Как правило, для этого создается высокопроизводительное оборудование в виде многшпиндельных полуавтоматов и автоматов, агрегатных многшпиндельных и многопозиционных станков, автоматических линий, роторных линий, автоматических цехов и заводов. Например, при обработке большого количества ступенчатых валиков используют полуавтоматы параллельного действия (называемые также

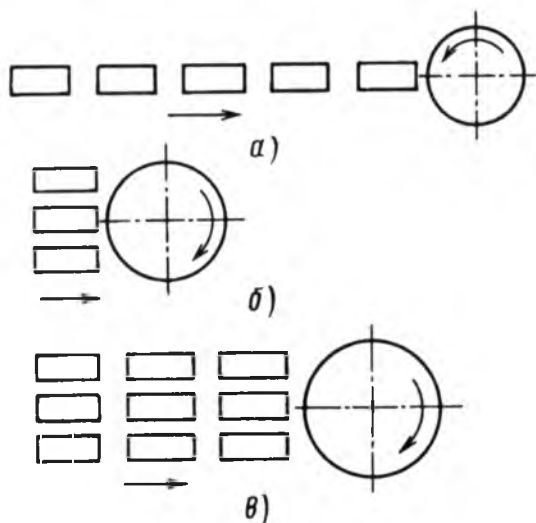


Рис. 1.12.17. Схемы возможной установки деталей для обработки

полуавтоматами непрерывного действия). Такой полуавтомат представляет собой как бы несколько многорезцовых или копировально-токарных станков, подвешенных на роторе (барабане), который непрерывно вращается вокруг вертикальной колонны. Следовательно, на таком полуавтомате обрабатывается параллельно несколько одинаковых деталей. Смена обрабатываемых деталей осуществляется во время вращения ротора при прохождении загрузочного места.

Последовательная обработка деталей и комбинированная (с совмещением переходов во времени) получили наиболее широкое применение. Примером может служить обработка одинаковых деталей на многошпиндельных полуавтоматах последовательного действия (например, токарных), где за один оборот шпиндельного блока шестишпиндельного полуавтомата производится полная обработка одной детали, но при этом на каждой из рабочих позиций, которые последовательно проходит каждая из деталей, обычно одновременно осуществляется несколько совмещенных во времени технологических переходов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Метод обработки и структура операции.
2. В чем разница между классом и группой обработки?
3. Записать формулы $t_{шт}$ для операций со структурой 1-го, 2-го и 3-го классов.
4. Как можно сократить затраты подготовительно-заключительного времени?
5. Способы сокращения затрат $t_{от}$.
6. Способы сокращения затрат $t_{вс}$.
7. Способы сокращения затрат $t_{оп}$.
8. Как назначают режимы обработки при колебании величины припуска и твердости материала заготовок?
9. За счет чего повышается производительность обработки при применении САУ с $P = \text{const}$?

Глава 1.13

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ**

Важнейшими выходными показателями технологического процесса являются производительность, качество и себестоимость изготовления изделия. Чем ниже себестоимость изделия (при достижении заданного качества), тем эффективнее технологический процесс. Однако стоимостной оценки технологического процесса не всегда достаточно для определения его эффективности.

Любой технологический процесс характеризуется затратами труда, времени, энергии и материалов, а также потребностью в рабочей силе, степенью влияния на окружающую среду, социальным эффектом, поэтому необходимо учитывать и эти факторы. Например, при равной себестоимости изготовления изделия по двум вариантам технологического процесса менее энергоемкий или с меньшим расходом дефицитного материала будет более эффективным.

В некоторых случаях тот или иной из перечисленных факторов становится важнейшим, и тогда он определяет уровень эффективности разработанного технологического процесса. Например, недостаток рабочей силы в ряде случаев вынуждает создавать такой уровень автоматизации процесса, при котором себестоимость изготовления может оказаться выше себестоимости другого процесса, менее автоматизированного, но требующего привлечения большого числа рабочих. Другой пример, если процесс, обеспечивающий наименьшие затраты в стоимостном выражении, наносит большой вред окружающей среде, то от него отказываются в пользу более дорогого.

Под эффективным технологическим процессом будем понимать процесс, обеспечивающий наименьшую себестоимость при заданном качестве и выпуске изделий с наименьшими затратами энергии, материала, рабочей силы, предусматривающий лучшие условия труда и оказывающий наименьшее влияние на экологию.

Наиболее важными путями повышения эффективности технологических процессов являются: повышение качества и производительности технологических процессов, сокращение расходов на материалы и заработную плату, повышение технологичности изделия, типизация и унификация технологических процессов, их автоматизация и механизация, совершенствование организации производства, улучшение условий труда. Ниже раскрывается содержание перечисленных путей повышения эффективности технологических процессов.

1.13.1. СНИЖЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ

Как следует из формулы расчета себестоимости (1.4.2), ее сокращение возможно за счет повышения производительности процесса, снижения расходов на материал, заработную плату, сокращения накладных расходов. Методы повышения производительности процессов изготовления изделий рассмотрены в гл. 1.12, поэтому ниже рассматривается сокращение остальных статей расходов.

Наиболее существенное влияние на снижение себестоимости машины оказывает количество изделий данной модели, подлежащих изготовлению по неизменяемым чертежам. Длительность времени выпуска изделия или, другими словами, общее количество изделий, изготавливаемых по неизменяемым чертежам, зависит, как правило, от морального износа изделия.

Под моральным износом понимается потеря изделием возможности экономично выполнять свое служебное назначение по сравнению с новым изделием того же назначения с более высокими технико-экономическими показателями. Действительно, если новое изделие даже при более высокой стоимости обладает настолько большой производительностью, что себестоимость выпускаемой им единицы продукции ниже, чем на ранее изготовленном изделии, эксплуатация последнего становится не экономической.

Чем лучше в конструкции изделия отражены современные достижения, тенденции и перспективы развития науки и техники, тем выше его технико-экономические показатели, и при прочих равных условиях меньше его моральный износ, тем дольше, а следовательно, и в большем количестве, такое изделие будет изготавливаться без изменений. С увеличением количества выпускаемых изделий меняется структура себестоимости изделия вследствие уменьшения доли затрат живого труда и увеличения доли затрат овеществленного труда при одновременном снижении их суммы. Объясняется это тем, что с увеличением количества изделий, подлежащих изготовлению, возрастает возможность использования более дорогого, но и более производительного технологического оборудования, инструмента и другой технологической оснастки, способствующих сокращению трудоемкости изготовления изделия.

Из графика на рис. 1.13.1 видно, как с увеличением количества изделий сокращается доля первоначальных затрат, приходившаяся на одно выпускаемое изделие. Следовательно, одним из основных мероприятий, способствующих снижению себестоимости изделия при известной в них

Рис 1.13.1. График сокращения затрат на технологическое оборудование и оснастку, приходящихся на одно изделие, с увеличением выпуска изделий



потребности, является увеличение количества изделий, их сборочных единиц и деталей, подлежащих изготовлению по неизменяемым чертежам.

Сокращение расходов на материалы возможно по трем направлениям: 1) сокращение массы материалов, расходуемых на изготовление одного изделия; 2) применение дешевых материалов; 3) получение отходов в виде, годном для их последующего использования.

Сокращение массы материалов, затрачиваемой на изготовление одного изделия, зависит в первую очередь от того, насколько рационально разработана конструкция изделия. Сократить массу расходуемого материала можно только на основе глубокого знания его свойств, что позволяет создавать менее материалоемкую конструкцию, с меньшим коэффициентом запаса прочности. Недостаточное знание свойств материала, недостаточно стабильное его качество и приближенные методы расчета приводят, в конечном счете, к значительным величинам запасов прочности, т.е. к излишнему расходу материалов.

Сокращение различного рода отходов и потерь материалов является одним из основных технологических и организационных мероприятий по сокращению расходов на материалы. Значительное количество отходов и потерь имеет место на машиностроительных заводах при получении заготовок деталей (угар металлов при плавке, сплески, скрап, остатки в плавильных агрегатах, окалина при нагреве, отходы в виде заусенцев, обрезки, облой, брак заготовок и др.).

При механической обработке часть материалов уходит в стружку, в обрезки при раскрое деталей из листового материала, в обрезки, получающиеся из-за некратности длины детали длине исходного материала при прутковых заготовках и в виде дополнительных элементов, необходимых для закрепления деталей при обработке, на изготовление пробных деталей при настройке технологической системы на требуемую точность и др.

Сокращение потерь и отходов не только экономит материалы, позволяя увеличить выпуск изделий, но и экономит непроизводительные затраты обоих видов труда как на данной, так и на всех предшествующих стадиях производства.

Степень рациональности использования материала определяется с помощью коэффициента использования материала

$$\eta = \frac{g_2}{g_1},$$

где g_1 – масса материала готового изделия; g_2 – масса материала затраченного на его изготовление.

Потери материалов сокращаются с уменьшением количества стадий, которые проходит исходный продукт до своего превращения в готовое годное изделие (идеальным было бы непосредственное превращение исходного продукта в годное изделие). В машиностроении эта тенденция сводится к непосредственному получению годного изделия из полуфабриката или к сокращению до минимума количества операций, которые должен пройти полуфабрикат до его превращения в готовое изделие. Например, непосредственное получение готовых болтов диаметром М10 из круглого прутка на современных холодновысадочных автоматах позволяет сократить отход металла в 2 раза и более по сравнению с изготовлением тех же болтов из шестигранного прутка на токарном автомате.

Значительную экономию металла дает использование сварных, штамповарных и литосварных заготовок, а также рациональный раскрой листов с одновременным изменением конструкции детали (рис. 1.13.2).

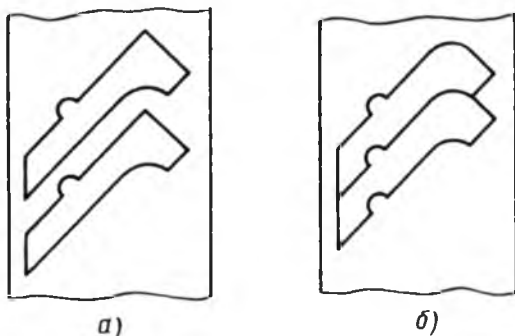


Рис. 1.13.2. Влияние изменения конструкции детали на сокращение отходов материала:

а – деталь до изменения конструкции;

б – деталь после изменения конструкции

Использование более дешевых материалов. Полное установление служебного назначения каждой детали в изделии и четкие формулировки всех условий, в которых должна работать та или иная деталь, дают возможность использовать для ее изготовления более дешевые материалы без снижения качества изделия. Примером может служить замена стальных шпинделей в ряде станков литыми чугунными, замена ряда стальных деталей (рычагов, вилок и др.) деталями из ковкого или модифицированного чугуна или замена стальных станин на железобетонные и т.д.

Уровень развития современной технологии позволяет изготавливать отдельные элементы той или иной детали, работающие в различных условиях, из разных материалов. Например, втулку, служащую опорой для вала, делают из разных материалов: внутреннюю часть – из более дорогого цветного сплава, а основную часть – из обычной стали (биметаллические втулки). Головка выхлопного клапана двигателя внутреннего сгорания работает в потоке горящих газов с высокой температурой, в то время как стержень клапана работает в нормальных условиях. Стыковая сварка позволяет делать стержень клапана из обычной хромистой стали, а головку клапана из жаростойкой силхромовой стали 40X10C2M. Во многих случаях экономия металла получается при изготовлении ряда деталей из различного рода заменителей.

Получение отходов в наиболее ценном виде. Отходы, получаемые при обработке различных материалов, могут иметь различную стоимость, зависящую от возможности их дальнейшего использования. Действительно, если при обработке отходы, например, металла, превращаются в стружку, обрезки, заусенцы и т.п., то стоимость 1 кг отходов значительно ниже первоначальной стоимости материала; если отходы могут быть использованы в качестве полноценных заготовок для изготовления других деталей, стоимость их обычно или не отличается от первоначальной стоимости материала, или близка к ней.

Примером полноценного использования отходов может служить получение четырех заготовок колец и стержня резца из отходов, образующихся при изготовлении каждой предшествующей заготовки (рис. 1.13.3). Другим примером может служить получение отхода в виде стержня металла при кольцевом сверлении детали большой длины специальной кольцевой головкой (рис. 1.13.4). На ряде заводов отходы нередко используются для изготовления других деталей изделия.

Расходы на заработную плату сокращаются посредством: уменьшения затрат времени на выполнение операций; увеличения числа единиц оборудования, обслуживаемых одним рабочим; снижения квалификации работы; уменьшения числа операций; автоматизации процесса.

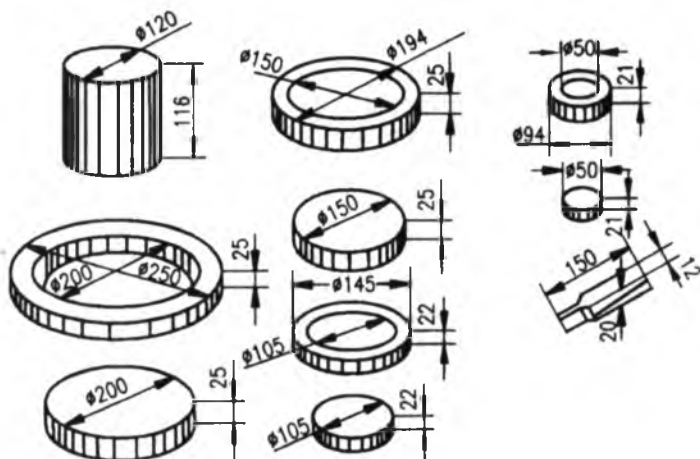


Рис 1.13.3. Пример использования отходов

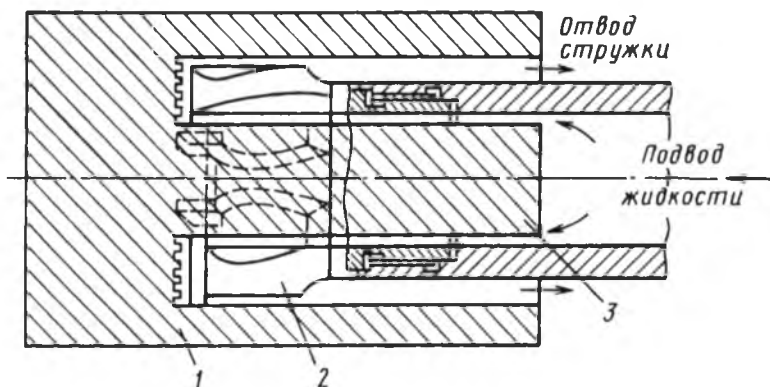


Рис. 1.13.4. Схема получения заготовки для стержня из отходов при операции рассверливания

Сокращение затрат времени на технологический процесс рассмотрено в гл. 1.12. Число единиц оборудования, обслуживаемых одним рабочим, увеличивается благодаря использованию многостаночного обслуживания и совмещения профессий.

Во время работы станка или другого вида оборудования у рабочего остается часть свободного, не используемого производительного времени. Следовательно, в течение этого времени он может обслуживать дополнительно некоторое число единиц оборудования. Например, количество станков i_p , которое может обслужить один рабочий при полном использовании его времени и при условии выполнении на каждом из станков одинаковых операций, может быть определено из отношения

$$i_p = \frac{T_{шт}}{T_p + T_x}, \quad (1.13.1)$$

где $T_{шт}$ – штучное время обработки на одном станке; T_p – время работы рабочего на одном станке; T_x – время перехода рабочего от одного станка к другому, отнесенное к каждому из станков.

Например, при $T_{шт} = 10$ мин, $T_p = 3$ мин и $T_x = 0,5$ мин

$$i_p \geq \frac{T_{шт}}{T_p + T_x} \geq \frac{10}{3,5} \geq 2,85 \approx 3 \text{ станка.}$$

Из примера следует, что при обслуживании одним рабочим трех станков рабочий загружен полностью, в то время как станки частично простаивают.

Итак, если i_p – число дробное, то при округлении числа в сторону увеличения, время рабочего будет использоваться полностью, но при этом будут простаивать станки. Если округлить i_p в меньшую сторону, то оборудование не будет простаивать, но при этом время рабочего будет использоваться.

Количество станков i_p при полном их использовании можно определить, изменив знак неравенства на противоположный:

$$i_p \leq \frac{T_{шт}}{T_p + T_x}. \quad (1.13.2)$$

Подставляя числовые данные, получаем

$$i_p \leq \frac{10}{3,5} \leq 2,85 \approx 2 \text{ станка.}$$

В этом случае, при полном использовании станков во времени, являются довольно значительные простои рабочего, в результате которых снижается производительность его труда, поэтому необходимо стремиться

ся к полному использованию во времени труда рабочего и работы оборудования. Из неравенств (1.13.1) и (1.13.2) следует, что это возможно в тех случаях, когда $T_{шт}$ кратно сумме $T_p + T_x$. Следовательно, для более полного использования труда рабочего и работы оборудования необходимо разрабатывать технологический процесс или подобрать работу на станках, обслуживаемых одним рабочим, так, чтобы по возможности соблюдать это соотношение. Этому же способствует такая расстановка оборудования и организация рабочего места, при которой рабочим затрачивается наименьшее время на переходы от одного станка к другому.

В большинстве случаев стремятся к полному использованию времени рабочего, за исключением операций, осуществляемых на уникальном и дорогостоящем оборудовании или оборудовании, лимитирующем пропускную способность производства. В первом случае слишком дорого обходится простой оборудования, во втором – не следует допускать простоя оборудования по вине рабочего.

В реальных условиях рабочему приходится обслуживать: одинаковое оборудование и одинаковые операции; одинаковое оборудование, но разные операции; различные виды оборудования.

Для обслуживания разных станков и даже видов оборудования возникла необходимость совмещения профессий, т.е. в приобретении рабочим требуемых знаний и навыков в их обслуживании.

Из изложенного следует, что для увеличения производительности труда рабочего следует обслуживать:

- 1) одинаковое оборудование, на котором выполняются: а) одинаковые операции; б) различные операции;
- 2) различные виды оборудования, на котором выполняются различные операции.

Сокращение накладных расходов возможно за счет сокращения всех слагаемых, составляющих накладные расходы в формуле расчета себестоимости (1.4.2), анализ которой показывает, что основными путями сокращения накладных расходов являются:

- 1) уменьшение расходов на амортизацию и содержание оборудования, технологической оснастки (приспособлений, транспортного и подъемного оборудования, стеллажей) и инструмента;
- 2) уменьшение прочих статей накладных расходов (сокращение управленческого аппарата завода, цикла производства для увеличения оборачиваемости оборотных средств, снижение брака, потерь).

Уменьшение расходов на амортизацию, как следует из формул (1.7.6) – (1.7.14), осуществляется путем выбора наиболее дешевых видов оборудования, технологической оснастки и инструмента, рациональной

планировки оборудования, цехов и других служб завода с целью сокращения расходов на их строительство. Этой же цели служит повышение производительности труда за счет сокращения времени выполнения технологических процессов.

Уменьшение расходов на содержание осуществляется повышением КПД оборудования и технологической оснастки, подбором к оборудованию электродвигателей требуемой мощности для сокращения расходов на электроэнергию, повышением качества ухода за оборудованием и технологической оснасткой путем их периодической смазки, очистки, регулировки, профилактического ремонта.

Принудительная смена режущего инструмента, его централизованная качественная заточка и переточка, работа с требуемыми режимами и с использованием надлежащих смазывающе-охлаждающих средств, восстановление и использование износившегося инструмента, бережное его хранение являются средствами уменьшения расходов на содержание режущего инструмента.

Правильный выбор методов и средств контроля сокращает расходы на амортизацию, а соблюдение условий правильной эксплуатации уменьшает расходы на содержание измерительного инструмента.

1.13.2. МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ РАЗНООБРАЗИЯ ОБЪЕКТОВ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Отличительной чертой современного машиностроительного производства является огромное разнообразие выпускаемых изделий. Это, в свою очередь, порождает большое разнообразие средств их технологического обеспечения (технологических процессов, оборудования, оснастки), что отрицательно сказывается на эффективности производства. Поэтому сведение к необходимому минимуму разнообразия выпускаемых изделий и средств технологического обеспечения позволит во многом решить проблему повышения эффективности производства.

К наиболее важным методам сокращения разнообразия объектов машиностроительного производства относятся стандартизация, унификация, типизация. Перечисленные методы относятся к одной категории, но отличаются местом в проблеме сокращения разнообразия и уровнем обобщения.

В основе проблемы сокращения разнообразия изделий лежит разрешение противоречия между производителем и потребителем, которое заключается в следующем. Сокращение разнообразия изделий приводит к тому, что для конкретных условий выбранное из ряда стандартных из-

делий наиболее подходящее полностью не сможет учесть всю совокупность условий эксплуатации, отсюда и эффективность его эксплуатации ниже в отличие от изделия, специально спроектированного. Однако, с другой стороны, сокращение номенклатуры изделий позволит увеличить серийность их выпуска и тем самым снизить себестоимость их изготовления.

В связи с этим возникает необходимость в выборе критерия, по которому следует решать задачу сокращения разнообразия. Таким критерием являются затраты на удовлетворение типоразмерами ряда изделий заданного спроса (потребности); при этом нельзя иметь в виду только затраты на производство. В самом деле, учет интересов только производителей неизбежно приведет к выбору неоправданно малого числа типоразмеров, поскольку благодаря этому можно достичь большей серийности выпуска и, следовательно, осуществить специализацию производства. С другой стороны, учет затрат только в сфере потребления приведет к неоправданно большому числу типоразмеров ряда, поскольку потребителям выгодно иметь достаточно широкое разнообразие типоразмеров изделий для сокращения потерь из-за несоответствия значений параметров предлагаемых и требуемых типоразмеров изделий.

Противоречие между производителями и потребителями (на общегосударственном уровне) следует разрешать по критерию наименьших суммарных затрат. В условиях рыночной экономики в выбор критерия вносит поправку учет конъюнктуры рынка.

Стандартизация решает задачу сокращения разнообразия A объектов посредством установления параметрических (типоразмерных) рядов объектов. Под параметрическим рядом объектов понимается совокупность типоразмеров, например, изделий некоторого функционального назначения, предназначенных для удовлетворения заданного спроса. Стандартизации должна предшествовать типизация и унификация объектов.

Типизация – это выделение из множества объектов такого представителя (типа), который содержит наибольшее число характерных свойств группы объектов этого множества.

Унификация – это рациональное сокращение числа объектов одинакового функционального назначения, т.е. приведение различных видов продукции к наименьшему числу типоразмеров, марок, форм, свойств и т.п.

Отличие унификации от стандартизации заключается в том, что, во-первых, унифицированные типоразмеры являются рекомендуемыми, а не обязательными и, во-вторых, при стандартизации лишь часть типов и число типоразмеров утверждается стандартом.

Таким образом, все три процесса (стандартизация, типизация и унификация) направлены на сокращение разнообразия объектов. При этом

уровень обобщения объектов растет в направлении типизация – унификация – стандартизация.

Стандартом утверждаются лишь некоторые унифицированные объекты, а область применения их становится шире.

Применяется также и **симплификация**, под которой понимается сокращение числа типов и других разновидностей объектов до числа, достаточного для удовлетворения существующих в данное время потребностей.

Следует подчеркнуть, что стандартизация, унификация и типизация объекта в виде изделия или технологического процесса далеко не используют всех резервов повышения эффективности производства. Как правило, объект, например, изделие – это сложная система, состоящая из многочисленных узлов, агрегатов, механизмов, деталей, отличающихся друг от друга и требующих разного технологического обеспечения. Аналогично и технологический процесс также состоит из соответствующих элементов. Отсюда возникает задача типизации, унификации, стандартизации не только изделий или технологических процессов, но и их элементов.

Применение в конструкции изделий унифицированных составных частей позволяет в 2 – 3 раза уменьшить количество выпускаемой конструкторской документации, до 1,5 – 2 раз сократить сроки разработки отдельных изделий и объемы различных видов испытаний, проводимых для подтверждения необходимого качества выпускаемой продукции.

При использовании унификации повышается качество выпускаемой конструкторской документации, что находит свое отражение в сокращении до 3 – 5 раз количества ее изменений. Это, в свою очередь, приводит к соответствующему уменьшению количества изменений в конструкции изделий и отклонений от нормального хода технологических процессов.

За счет сокращения общего количества типоразмеров при унификации составных частей конструкции серийность производства может увеличиваться в 1,5 – 2,5 раза. При этом среднее число деталей, приходящихся на один унифицированный типоразмер конструкции, как правило, в 2 – 3 раза выше. Это обусловлено тем, что конструктору легче унифицировать небольшие, часто встречающиеся типоразмеры деталей. Сокращение разнотипности типоразмеров приводит к уменьшению требуемого количества технологической оснастки или увеличивает уровень оснащенности производства при одном и том же количестве оснастки.

Унификация элементов и составных частей конструкции оказывают существенное влияние не только на рациональное использование ресурсов при разработке и изготовлении изделия, но и на процесс его эксплуа-

тации. В результате применения методов стандартизации и унификации упрощается техническое обслуживание изделий и улучшается их ремонтопригодность.

Унификация составных частей изделия приводит к сокращению объемов работ по регламентированному обслуживанию машин, повышает их надежность в процессе эксплуатации. В результате уменьшается количество инструмента и приспособлений, сокращается время технического обслуживания изделий, уменьшаются затраты на материалы, а также снижаются стоимость и трудоемкость процесса эксплуатации.

1.13.2.1. Системный подход в унификации объектов в машиностроительном производстве

Унификация объектов по области применения делится на конструкторскую и технологическую. При конструкторской унификации в качестве объекта выступают конструкции изделий и их элементы, а при технологической унификации – технологические процессы, оборудование, оснастка и их элементы.

В конструкторской унификации можно выделить *следующие основные направления*.

1. Создание универсальных конструкций на базе передового опыта разработки определенного типа систем; высшей формой универсализации конструкций является их стандартизация.

2. Создание конструкций изделий из отдельных блоков, которые, являясь единым целым, могут применяться в различной комплектации при разработке систем с отличающимися техническими характеристиками.

3. Соблюдение преемственности технических решений, которая проявляется в заимствовании составных частей изделий из одной конструкции в другую. Преемственность составных частей имеет две разновидности: заимствование их предшествующих разработок, одна из которых может быть базовой; заимствование в рамках разрабатываемой конструкции и из других одновременно создаваемых изделий.

Однако следует иметь в виду следующие *отрицательные стороны конструкторской унификации*, которые принимают во внимание:

1. Преемственность новой конструкции с предшествующими разработками может в ряде случаев привести к "фиксации" отдельных технических характеристик, достигнутых на момент создания изделий предшественников.

2. Выходные параметры отдельных заимствованных составных частей не всегда полностью удовлетворяют разработчика, так как могут

не обеспечивать требуемый уровень отдельных технических характеристик новой конструкции.

3. Применение унифицированных составных частей может привести к повышению массы конструкции, а следовательно, к увеличению ее материалоемкости, что может быть обусловлено введением дополнительных элементов для конструктивной увязки заимствованных составных частей, а также повышенными значениями их массы по сравнению с массой аналогичных оригинальных конструктивных решений.

Конструкторская унификация тесно связана с технологической. Примером может служить увеличение преемственности технологических процессов и оснастки при повышении удельного веса заимствованных элементов в конструкциях изделий.

Основные направления технологической унификации:

1. Преемственность производственной базы, технологических процессов и средств их оснащения. Отработка конструкции вновь создаваемых изделий на технологичность, особенно в направлении обеспечения ее конструктивно-технологической преемственности с предшествующими конструкциями, а также соблюдение условия изготовления последовательного ряда однотипных изделий на одном предприятии обеспечивает сокращение затрат на подготовку производственной базы для выпуска новых изделий.

2. Создание типовой, универсальной, переналаживаемой и сборно-разборной технологической оснастки, а также применение принципов стандартизации при ее разработке. Стандартизация элементов конструкции технологической оснастки и применение принципов типизации и универсализации, сборности и переналаживаемости при ее создании приводит к уменьшению объемов работ, затрат трудовых, материальных, стоимостных и временных ресурсов, требуемых для проведения технологической подготовки производства.

3. Применение типовых технологических процессов способствует внедрению групповых форм организации труда, сокращает сроки и затраты на разработку необходимой документации в процессе технологической подготовки производства. Степень использования типовых технологических процессов в значительной мере определяется стандартизацией и унификацией конструктивных элементов деталей.

Отличительной особенностью технологической унификации является возможность использования ее методов при изготовлении как унифицированных, так и оригинальных составных частей новых изделий. Значение технологической унификации возрастает с увеличением конструк-

тивной сложности изделий, обуславливающей рост требуемого количества технологических процессов и оснастки для обеспечения высокого качества изделий.

Широкое внедрение унификации в производство будет только в том случае, если у производителя существуют побудительные мотивы к решению этой задачи. С одной стороны, таким мотивом является необходимость в условиях рынка переходить на выпуск новых изделий высокого качества в короткие сроки и с минимальными издержками, с другой, – получение экономического эффекта от применения унификации. Решение обеих задач возможно, если любому унифицированному изделию соответствуют унифицированные средства технологического обеспечения и организационные формы производственного процесса.

В связи с этим необходима унификация с позиций системного подхода, в основе которого лежит взаимосвязанная унификация объектов производственной цепочки *"изделие – технологический процесс – технологическая система – организация производственного процесса"*. В машиностроительном производстве системный подход заключается в том, что для унифицированного изделия используются унифицированные средства технологического обеспечения: технологический процесс, оборудование и оснастка, рабочие места.

Анализ унификации объектов каждого звена производственной цепочки и их взаимосвязей показывает следующее.

К объектам унификации звена "изделие" относится само изделие и его составные части: агрегаты, механизмы, устройства, детали; унификация носит, как правило, отраслевой характер (унификация автомобилей, строительных машин, станков и т.п.). В отношении унификации объектов, входящих в состав изделий в качестве его элементов, можно констатировать, что чем ниже уровень объекта в иерархии элементов изделия (например, подшипники, зубчатые колеса), тем в большей степени они приобретают межотраслевой характер. Проведен сравнительно большой объем работ по унификации объектов звена "изделие", но еще остается большое количество как изделий, так и их элементов, не охваченных унификацией.

Большая работа проведена по унификации и элементов изделий на уровне механизмов и устройств (например, унификация редукторов, подшипников, на уровне деталей; зубчатых колес; крепежа и др.). Чем ниже уровень, на котором располагается элемент в иерархии элементов изделия, тем вероятнее его более широкое применение в многочисленных изделиях и тем больший эффект ожидается от унификации.

Объектами унификации звена "технологический процесс" является как сам технологический процесс, так и его составляющие – маршрутный процесс и операция.

Здесь, в отличие от звена "изделие", результаты унификации значительно скромнее; объяснить это можно огромным разнообразием технологических процессов, являющихся результатом таких объективных факторов, как разная оснащенность машиностроительных предприятий технологическим оборудованием и оснасткой, различие в объемах выпускаемой продукции в единицу времени, различие производственных условий.

Когда разрабатывается типовой или унифицированный технологический процесс, то всегда за ним закрепляется определенное технологическое оборудование. Если на предприятии этого оборудования нет, то возникает проблема в реализации процесса. С другой стороны, в повседневной практике в силу организационных причин часто возникает проблема, например, в обеспечении процесса требуемой технологической оснасткой, и тогда приходится в спешном порядке подыскивать или изготавливать другую оснастку, не заложенную унифицированным процессом, а следовательно, изменять и технологический процесс.

В отличие от изделий, которые можно унифицировать по одному-двум параметрам, унификация технологических процессов по одному-двум признакам не дает эффекта. Это связано с тем, что наличие у детали одной группы какой-либо дополнительной характеристики может не позволить применить унифицированный технологический процесс.

Это подтверждает применение типовых технологических процессов. На практике очень часто приходится при разработке рабочего технологического процесса исключать или заменять ту или иную операцию из типового процесса, не говоря уже об изменениях в режимах обработки на операциях. Учет всех существенных особенностей детали, влияющих на технологический процесс, приведет к снижению количества деталей в группе, что потребует большего числа унифицированных технологических процессов. В результате эффект от унификации получится незначительным.

Еще одной причиной, снижающей эффект унификации технологических процессов, является их невысокая устойчивость во времени из-за непрерывного развития методов изготовления и средств технологического оснащения, а также самих изготавливаемых изделий. В итоге в большей степени эффект можно ожидать от унификации маршрутных технологических процессов, отличающихся меньшим числом характеристик.

Унификация объекта звена "технологическая система" по объему и уровню близка к унификации объектов звена "изделие", так как это те же

машины, состоящие из механизмов, устройств, деталей, подпадающие под категорию объектов звена "изделие". Все достижения в унификации последних в значительной степени справедливы и для них.

Следует отметить недостатки унификации технологических систем. Например, отсутствует унификация обрабатывающих и сборочных технологических систем как самостоятельных объектов, и их подменяют станками, сборочным оборудованием, являющимися составными частями технологических систем. В результате, при проектировании технологических процессов приходится подбирать среди существующего оборудования не технологические системы, а их составные части.

Другим важным недостатком является отсутствие унификации элементов технологических систем: инструментальных наладок, приспособлений, контрольно-измерительных устройств. В итоге это не позволяет установить связи между унифицированными объектами звеньев "технологический процесс" и "технологическая система".

В качестве объектов звена "организация производственного процесса" можно рассматривать производственные цехи, участки, рабочие места. Объекты этого звена, как и звена "технологический процесс", оказались практически не унифицированы.

Таким образом, наблюдается разный уровень унификации звеньев производственной цепочки. Если унификация объектов звена "изделие" нашла достаточно широкое распространение, то унификация объектов звеньев "технологический процесс" и "организация производственного процесса" практически отсутствует.

Наиболее важным недостатком является отсутствие тесных связей между унифицированными объектами звеньев производственной цепочки. Если между объектами первых звеньев связь в какой-то мере существует, то дальше она практически исчезает. Например, к широко распространенным узлам и деталям, имеющим общемашиностроительное назначение (подшипники качения, зубчатые колеса и т.п.), можно встретить соответствующие унифицированные или типовые технологические процессы и технологические средства. В других случаях эта связь проявляется по отдельным унифицированным параметрам, например, стандартным значениям размера диаметра отверстий деталей соответствуют размеры мерного инструмента (сверла, зенкера, развертки).

Слабые связи между унифицированными объектами звеньев можно объяснить, во-первых, отсутствием постановки такой задачи, во-вторых, независимостью развития этих объектов и, в третьих, неравномерностью степени унификации объектов звеньев производственной цепочки. В ито-

ге отсутствуют тесные связи между их классификациями, которые невозможно объединить в единую систему. К примеру, при разработке типовых технологических процессов изготовления деталей они классифицируются в соответствии с конструктивными формами, требованиями к точности деталей. В свою очередь, при создании станков связь их с типовыми процессами отсутствует и станки классифицируются по методу обработки (сверлильные, фрезерные и т.п.).

При отсутствии тесных связей между унифицированными объектами звеньев производственной цепочки эффект от применения унификации будет минимальным. К примеру, если для унифицированной детали нет соответствующего унифицированного технологического процесса, то эффект от ее унификации будет только за счет снижения трудоемкости проектирования. Если же унифицированному технологическому процессу нет соответствующей унифицированной технологической системы, эффект будет только от сокращения трудоемкости проектирования процесса. В этом случае для унифицированной детали придется проектировать индивидуальный технологический процесс, а к унифицированному технологическому процессу – технологическую систему.

Следовательно, главный резерв повышения эффективности от применения унификации – обеспечение связей между унифицированными объектами производственной цепочки. Иными словами, унифицированному объекту звена "изделие" должен соответствовать унифицированный объект звена "технологический процесс", а ему – унифицированный объект звена "технологическая система" и т.д. При этом надо отметить, что на фоне непрерывного развития и усложнения техники, роста разнообразия средств ее технологического обеспечения, роль унификации чрезвычайно возрастает. Поэтому дальнейшее развитие унификации в машиностроении должно осуществляться с позиций системного подхода, когда унификации одновременно подвергаются связанные между собой объекты всех звеньев производственной цепочки.

Системный подход базируется на установлении связей по вертикали между объектами одного звена и по горизонтали между объектами звеньев производственной цепочки, когда на каждом уровне объекту звена "изделие" должен соответствовать объект звена "технологический процесс" и т.д.

Можно предложить следующий подход к установлению указанных связей. Начинать надо с определения состава объектов каждого звена и их иерархии. При этом следует придерживаться правила, что объект верхнего уровня представляет собой совокупность объектов предыдущего уровня.

Звено "изделие". Изделие рассматривается как объект производства и потому состав и иерархию объектов можно представить как цепочку: изделие – сборочная единица – деталь – МС – МП.

Звено "технологический процесс" можно представить цепочкой объектов: технологический процесс – операция – МТС – МТИ.

Звено "технологическая система" можно представить цепочкой объектов: технологическая система – модули функциональные технологические – МО, МИ, МПр, МКИ.

Звено "организация производственного процесса" можно представить цепочкой объектов: производственный участок – рабочее место – модуль рабочего места.

Если свести все вертикальные цепочки объектов звеньев в одну схему, как это показано на рис. 1.13.5, то станут очевидными горизонтальные связи между объектами звеньев. Как следует из схемы, с понижением уровня расположения объекта снижается и уровень его сложности. Таким образом, появляется зависимость степени сложности объекта от уровня его расположения.

На эффективность унификации большое влияние оказывают такие характеристики объекта как его разнообразие, устойчивость, повторяемость.

Унификация должна начинаться с обоснования выбора объекта, гарантирующего наибольший эффект.

Проблема унификации состоит еще и в том, что объект описывается некоторым множеством характеристик, и чем большее число характеристик объекта охвачено унификацией, тем ближе он будет приближаться к замещаемым объектам, но при этом будет расти и число унифицированных объектов. В связи с этим по мере роста сложности объекта растет доля частичной унификации, когда объект подвергается унификации по одной или несколькими характеристикам.

Унификация объектов звеньев производственной цепочки должна осуществляться слева направо, т.е. сначала унификации подвергается объект звена "изделие", затем объект его уровня звена "технологический процесс" и т.д.

Необходимо отметить, что уровень разнообразия объектов последующих звеньев производственной цепочки выше уровня разнообразия объектов предыдущих звеньев. Например, одному изделию соответствует несколько технологических процессов. Это связано с тем, что при выпуске изделия в разных объемах требуются разные технологические процессы. В свою очередь один и тот же технологический процесс может быть реализован с помощью разных технологических систем.

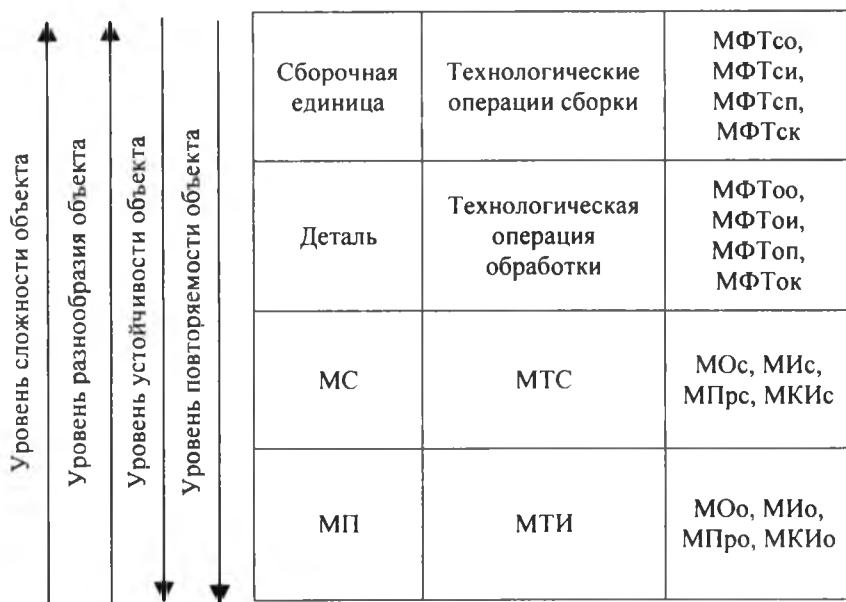


Рис. 1.13.5. Схема связей между объектами звеньев производственной цепочки:

Модули функциональные технологические сборочной системы:

МФТсо – оборудования, МФТси – инструментальной наладки, МФТсп – приспособления, МФТск – контрольно-измерительного устройства

Модули функциональные технологические обрабатывающей системы:

МФТоо – станка, МФТои – инструментальной наладки, МФТоп – приспособления, МФТок – контрольно-измерительного устройства

Модули получения МС: МОс – сборочной машины, МИс – инструментальной наладки, МПрс – приспособления, МКИс – контрольно-измерительного устройства

Модули изготовления МП: МОо – станка, МИо – инструментальной наладки, МПро – приспособления, МКИо – контрольно-измерительного устройства

Начинать реализацию системного подхода в унификации надо с объектов наименьшей сложности первого звена производственной цепочки.

1.13.3. ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

Технологичность конструкции изделий оказывает большое влияние на снижение затрат труда, материалов и энергии, связанных с его изготовлением, технологическим обслуживанием, ремонтом и утилизацией.

Поэтому спроектированное конструктором изделие должно отвечать требованиям не только его эксплуатации, но и процессов его изготовления (сборки, получения заготовок, изготовления деталей), технического обслуживания, ремонта и утилизации. Достижение высокой технологичности конструкции изделия зависит от сотрудничества конструктора и технолога в процессе его создания. Это позволяет разрешать противоречия между требованиями к технологичности изделия различных процессов его жизненного цикла.

Технологичность конструкции изделия является существенной характеристикой совершенства изделия, так как в значительной степени определяет уровень технико-экономических показателей его производства.

Обеспечение технологичности конструкции изделия осуществляется на уровне деталей, сборочных единиц и изделия в целом. Наиболее общие требования к технологичности конструкции изделий:

- рациональность членения, компоновки изделий и их составных частей;
- широкое использование принципов конструктивной и технологической преемственности, унификации, стандартизации и симплификации;
- рациональное ограничение количества марок и сортов материалов;
- широкое использование недефицитных материалов и материалов, обработка которых не вызывает трудностей;
- рациональное назначение допусков и параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей;
- обеспечение удобства базирования деталей в изделии и заготовок при их обработке и, по возможности, достижение достаточной жесткости конструкции;
- соблюдение условий, обеспечивающих упрощение сборочных работ и возможности их механизации и автоматизации;
- создание деталей таких конструктивных форм, которые позволяют применять более производительные методы обработки и использовать высокопроизводительное оборудование;
- уменьшение многообразия видов обрабатываемых поверхностей и геометрических размеров однотипных элементов конструкции детали;
- максимально возможное упрощение конструкции сборочных единиц и деталей;
- возможность применения прогрессивных технологических процессов, высокопроизводительного оборудования и более совершенных методов организации труда, что требует наличия в деталях или сборочных единицах определенных конструктивных элементов;

– удобство технического обслуживания и ремонта в процессе эксплуатации, что требует внесения в конструкцию определенных элементов.

Разнообразие изделий и многочисленность факторов, влияющих на технологичность, не позволяют установить единые требования к конструкции изделий. Рассмотрим требования к конструкции изделий в зависимости от его уровня.

Требования к изделию как к сборочной единице, обеспечивающие повышение его технологичности, можно разделить на общие и зависящие от конкретных технологических методов сборки и условий их применения. *Общие требования перечислены ниже:*

1. Минимальное число сборочных единиц и деталей в изделии и минимальное число деталей в сборочных единицах (чем меньше деталей, тем меньше трудоемкость сборки).

2. Отсутствие взаимосвязанных технических условий на конструкцию изделия (наличие взаимосвязанных технических условий существенно усложняет процесс их обеспечения).

3. Отсутствие параллельно связанных размерных цепей (наличие параллельно связанных размерных цепей в изделии повышает трудоемкость как технологической подготовки сборки изделия, так и трудоемкость самого процесса сборки).

В процессе сборки изделия, содержащего параллельно связанные размерные цепи, при достижении точности методом пригонки или регулировки нередко получается так, что погрешность из одной размерной цепи переходит в другую. Это бывает тогда, когда в качестве компенсирующего выбирают общее звено.

4. При обеспечении точности размерных цепей желательно применение в первую очередь методов полной и неполной взаимозаменяемости.

5. Наличие у изделия базовой детали (желательно, чтобы не только изделие, но и все его сборочные единицы имели базовые детали). Базовая деталь должна отличаться высокой жесткостью, чтобы ее упругие деформации практически не влияли на точность расположения сборочных единиц и деталей изделия.

6. Обеспечение определенности базирования деталей в изделии за счет создания у деталей полных комплектов конструкторских баз и соответствия их требованиям к базам.

Обеспечению определенности базирования способствует наличие у деталей полных комплектов конструкторских баз и соответствие их правилам базирования. Если эти условия не выполняются, то, с одной сторо-

ны, возникают единичные и многократные изменения положения деталей в машине во время ее эксплуатации, т.е. неопределенность базирования, а с другой, – трудности в обеспечении заданной точности в процессе сборки машины.

7. Наличие типовых и унифицированных элементов в изделии, что существенно упрощает и сокращает технологическую подготовку производства, ее трудоемкость и сроки.

8. Возможность разделения изделия на сборочные единицы. Изделие приобретает высокую степень технологичности, если его механизмы устройства, агрегаты одновременно являются и его технологическими сборочными единицами. Это дает возможность осуществлять сборку из предварительно собранных и проверенных сборочных единиц, организовывать параллельную сборку, строить сборочный процесс в форме общей сборки и сборки технологических сборочных единиц, применять поточный вид организации сборочных процессов.

9. Сборочные единицы должны быть рассчитаны на минимальное количество различных видов технологических процессов сборки (соединение болтами, клепкой, сваркой, пайкой и т.д.), быть по возможности простыми и представлять собой законченное изделие для определенного производственного участка, а также иметь минимально возможное количество сочленений.

10. Конструкция сборочной единицы должна обеспечивать возможность проведения регулировочных и контрольных операций; частные регулировки не должны нарушать регулировки сложной сборочной единицы.

11. Конструкция изделия должна предусматривать возможность его сборки без сложных приспособлений, желательно с одной стороны, а также свободный доступ для монтажа всех деталей и сборочных единиц и измерения подвода инструментов к местам соединения деталей.

12. Для удобства ремонта и обслуживания изделия его конструкция должна быть удобной для разборки; необходимо предусматривать применение простых инструментов для регулировки, различного рода съемников и других несложных приспособлений. Безусловно, не рекомендуется восстанавливать и ремонтировать детали, трудно извлекаемые из машины, требующие специальной оснастки, дорогого технологического процесса и др.

13. При создании конструкции следует заранее предусматривать, какие элементы, детали или агрегаты подлежат в течение срока службы замене или восстановлению и какое число раз; в первую очередь имеются

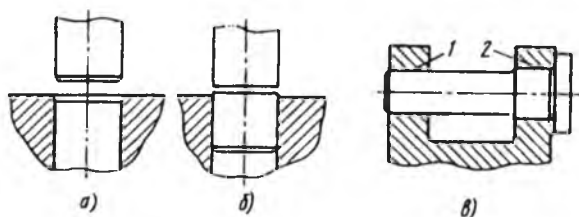


Рис. 1.13.6. Примеры конструктивных решений, повышающих технологичность сборки цилиндрических соединений

в виду быстроизнашивающиеся элементы рабочего оборудования, например, кромки ножа, отвала, зубья ковша землеройных и землеройно-транспортных машин и т.п.; их крепление с одной стороны должно быть прочным и надежным, а с другой стороны, — быстроразъемным.

Кроме общих требований, необходимо учитывать частные, обусловленные применением конкретных методов, способов и условий сборки. Например, при сборке цилиндрических соединений с гарантированным зазором и натягом надо предусматривать заходные фаски на наружной и внутренней поверхностях (рис. 1.13.6, а), а также направляющие элементы (пояски) для устранения перекосов (рис. 1.13.6, б). Другой пример: при соединении деталей по двум поверхностям во избежание появления задиры поверхности сопряжения 1 и 2 следует выполнять ступенчатыми (рис. 1.13.6, в). При соединении деталей больших размеров их центровку легче осуществлять не по диаметру, а с помощью двух контрольных штифтов и т.д.

Широко распространены резьбовые соединения; чтобы облегчить их свинчивание (наживление), надо применять заходные фаски или направляющие элементы (рис. 1.13.7, а). Для повышения производительности желательно пользоваться торцовыми ключами. Чтобы можно было их применять, необходимо предусматривать соответствующее расстояние от оси резьбового элемента до стенки детали (рис. 1.13.7, б).

Повышение технологичности конструкции детали обеспечивается следующими мероприятиями.

1. Малое число поверхностей детали: чем меньше поверхностей, тем меньше трудоемкость изготовления детали.

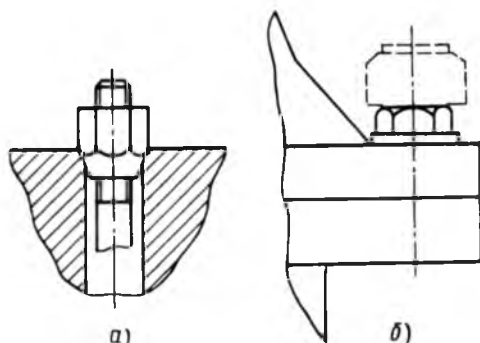


Рис. 1.13.7. Примеры конструктивных решений, повышающих технологичность сборки резьбовых соединений

2. Малая протяженность обрабатываемых поверхностей, повышенная точность заготовок, что сокращает трудоемкость механической обработки.

3. Удобство и надежность базирующих поверхностей для установки заготовок при обработке, совмещение установочных и измерительных баз.

4. Достаточная жесткость детали, при которой силы резания и закрепления не порождают ощутимых деформаций, что позволяет вести обработку на высоких режимах.

5. Обеспечение возможности удобного подвода режущего инструмента и измерительных средств к обрабатываемым поверхностям, сокращение пути врезания инструмента, обеспечение его свободного выхода.

6. Выполнение обрабатываемых поверхностей выступающими над необрабатываемыми, что обеспечит удобство подвода инструмента и обработку напроход нескольких поверхностей. Обработка напроход – это снятие слоя материала с одной или нескольких поверхностей заготовки при свободном входе и выходе инструмента. Примеры поверхностей, обрабатываемых напроход, даны на рис. 1.13.8, б, в. Для сравнения на рис. 1.13.8, а показана деталь, в которой предусмотрено зенкование цилиндрических углублений с целью получения опорных поверхностей вокруг отверстий. В детали, показанной на рис. 1.13.8, б, опорные поверхности получают более технологичным путем – перемещением инструмента (фрезы или шлифовального круга) вдоль обрабатываемой поверхности. Поверхности при этом расположены на разной высоте, что затрудняет их обработку, вход или выход инструмента (сравни с рис. 1.13.8, в).

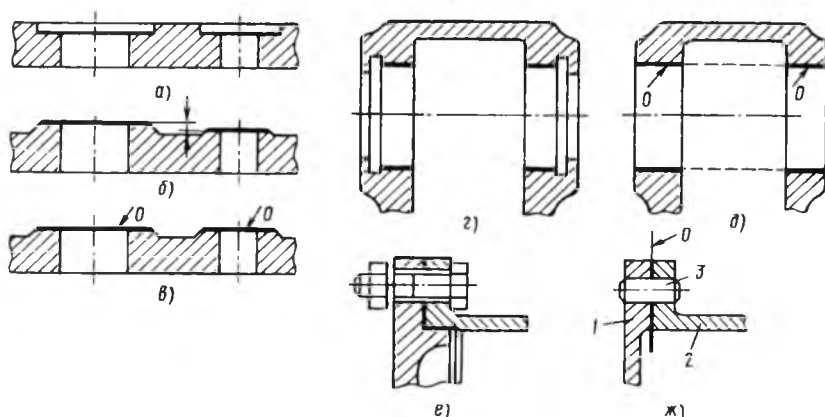


Рис. 1.13.8. Примеры изготовления поверхностей деталей напроход

7. При выборе баз следует стремиться к совмещению конструкторской, технологической и измерительной баз. На чертеже все размеры проставляют от таких совмещенных баз. При несоблюдении этого условия приходится вводить технологические размеры, удлинять размерные цепи и ужесточать допуски на составляющие размеры.

8. Большое влияние оказывает конструкция детали на производительность обработки. При выборе конструктивных решений деталей необходимо предусматривать дополнительные элементы, связанные с правильной ориентацией, размещением инструмента при изготовлении, удобством сборки и разборки соединений.

9. Для повышения технологичности рекомендуется предусматривать сквозные отверстия, так как их обрабатывать значительно легче, чем глухие. Конфигурация глухих отверстий должна быть увязана с конструкцией применяемого осевого инструмента, например, зенкера или развертки и др.

1.13.4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Целью автоматизации производства является повышение производительности труда, улучшение качества продукции, устранение человека от непосредственного участия в производственном процессе и в первую очередь от тяжелых работ и работ в условиях, опасных для здоровья.

В автоматизации производства можно выделить два направления – автоматизацию производственных процессов и инженерного труда.

Автоматизация производства развивалась постепенно. На первой ступени были автоматизированы станки. В станке-полуавтомате автоматизировано управление только рабочим процессом, а загрузка и разгрузка осуществляется человеком. В станке-автомате или автоматической сборочной машине уже автоматизированы дополнительно операции загрузки и разгрузки.

Следующая ступень автоматизации – устранение человека от участия в настройке технологической системы на изготовление первого изделия и ее подналадка во времени.

Объединение станков-автоматов в линию позволяет получить более высокий уровень автоматизации. Применение автоматических линий в крупносерийном и массовом производстве дает существенный экономический эффект.

Автоматизация в машиностроении в первой половине XX столетия касалась в основном массового производства и только в 50-е годы автоматизация в единичном и мелкосерийном производствах стала осуществляться с помощью станков с ЧПУ.

Современное производство требует высокой гибкости и мобильности, способности быстро и с минимальными издержками переходить на выпуск новых изделий. Применение станков с ЧПУ способствовало решению этой задачи.

Станки с ЧПУ способны сравнительно быстро переналаживаться с обработки одной детали на обработку детали другого типоразмера. При этом существенно сокращаются затраты подготовительно-заключительного времени и вспомогательного времени, автоматизируется процесс обработки, а функции рабочего заключаются главным образом в загрузке и разгрузке станка. Широкоуниверсальные многооперационные станки (обрабатывающие центры) способны за одну установку обработать заготовку с пяти сторон, различными методами: например, сверлением, фрезерованием, растачиванием. При этом на обрабатывающих центрах в силу их высокого качества и уровня автоматизации удается получить более высокий эффект. Так, при обработке на обычных универсальных станках $t_{\text{вс}}$ составляет 70 %, а $t_{\text{от}}$ – 30 % времени; при обработке на обрабатывающем центре $t_{\text{вс}} = 30$ %, а $t_{\text{от}} = 70$ % штучного (рис. 1.13.9). Однако стоимость обрабатывающих центров на один-два порядка выше при невысокой технологической производительности, так как поверхности заготовки обрабатываются последовательно с одного шпинделя. Таким образом, стоимость одной станко-минуты резко увеличивается.

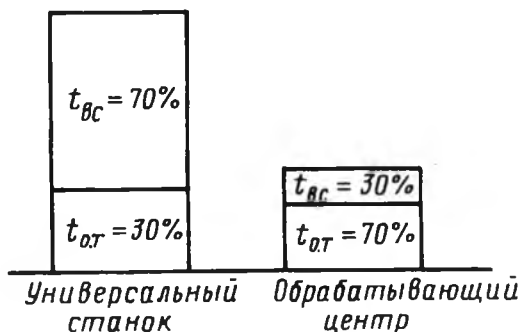


Рис. 1.13.9. Соотношения $t_{от}$ и $t_{обс}$ на станках:

а – универсальном с ручным управлением; *б* – обрабатывающем центре

Высокая стоимость, невысокая производительность, сложность в эксплуатации и обслуживании станков с ЧПУ сдерживают повышение эффективности производства. Резервы повышения эффективности автоматизации производственных процессов на базе станков с ЧПУ заключаются, прежде всего, в максимальном использовании годового фонда времени.

Так, например, годовой фонд времени составляет 8760 ч (рис. 1.13.10); выходные и праздничные дни – 2664 ч. Из оставшихся часов следует исключить время третьей смены и затраты времени, связанные с неполным использованием второй смены (2000 ч), с отказами оборудования, с наладкой и переналадкой технологической системы, сменой инструмента, загрузкой и разгрузкой и др. (1720 ч). Если учесть, что для обрабатывающего центра вспомогательное время составляет примерно 30 % штучного, то в итоге годовой фонд используется только примерно на 25 %. Таким образом, главная задача в повышении эффективности автоматизации заключается в более полном использовании годового фонда времени.

Другой резерв повышения эффективности автоматизации скрыт в сокращении времени пролеживания заготовки в процессе ее изготовления. Например, в мелкосерийном производстве (рис. 1.13.11) заготовка только около 10 % времени находится в рабочей зоне, остальные 90 % она пролеживает у станка или на складе в ожидании обработки, или транспортируется.

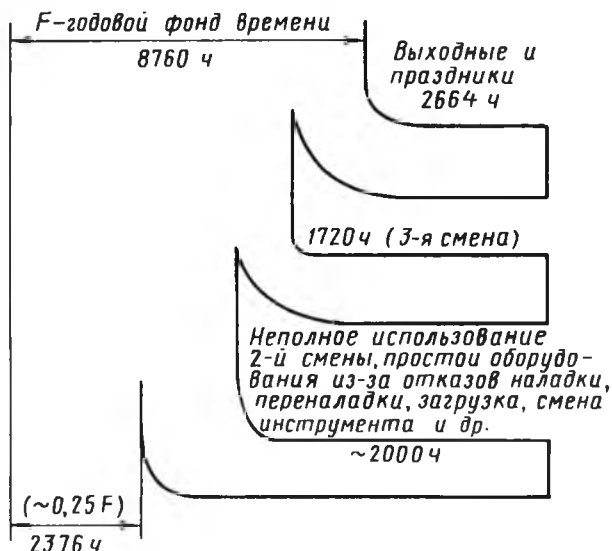


Рис. 1.13.10. Схематичное представление использования годового фонда времени работы станка



Рис. 1.13.11. Цикл изготовления детали в мелкосерийном производстве

Есть еще один существенный аспект автоматизации, имеющий не столько экономическое значение, сколько социальное, заключающийся в том, что автоматизация освобождает человека от утомительного, однообразного труда и делает его труд безопасным. Последнее становится все более важным и не только вследствие вредности некоторых видов производств, но и вследствие высокой и постоянно растущей энергонасыщенности станков в производственных помещениях. Это означает существенное повышение концентрации механизмов в помещениях, способствующих опасности нахождения человека в рабочей зоне технологической системы.

Таким образом, чтобы получить максимальный эффект от автоматизации, последняя должна обеспечить полное использование годового фонда времени работы оборудования, высокую производительность и минимальное пролеживание заготовок в процессе их изготовления. Все это решается созданием гибкого производства на базе безлюдной технологии. Такие гибкие производства получили название гибких производственных систем (ГПС).

При этом понятие "гибкость" не следует отождествлять с понятием "переналаживаемое", так как последнее предполагает прерывание производственного процесса для переналадки оборудования.

Создание полностью автоматизированного производства начиналось с комплексной автоматизации с последующим переходом к компьютеризированному интегрированному производству.

Компьютеризированное интегрированное производство отличается от комплексной автоматизации тем, что при последней автоматизируются отдельные производственные процессы, функции, задачи (основные, вспомогательные, обслуживающие) без увязки их в единую систему; тогда как интеграция производства предполагает объединение их в единую систему управления, при сохранении автономности их работы.

Гибкая производственная система – это совокупность в разных сочетаниях оборудования с ЧПУ, роботизированных технологических комплексов, гибких производственных модулей, отдельных единиц технологического оборудования и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного интервала времени, обладающая свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик.

По организационным признакам различают следующие виды ГПС: гибкие автоматизированные линии (ГАЛ), гибкие автоматизированные участки (ГАУ), гибкие автоматизированные цехи (ГАЦ) и заводы.

Для реализации гибких автоматизированных производств потребовался новый метод подготовки и функционирования производства – безбумажного и безлюдного производства. В условиях ГПС отпадает необходимость в технической и сопроводительной документации. Ее заменяют машинные носители, либо информация, передаваемая по локальной сети связи.

В общем случае ГПС объединяет системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), технологической подготовки производства (АСТПП), управления производством (АСУП) и др. Результаты, формируемые системами САПР, АСТПП и АСУП, представляют собой программы производства, дифференцированные до уровня операций и определяющие очередность пуска партий деталей на изготовление, а также управляющие программы для технологического оборудования.

АСУП осуществляет календарное планирование, расчет сменных заданий, контроль выполнения плана. Автоматизированная система технологической подготовки производства разрабатывает технологические процессы, управляющие программы, выбирает или проектирует режущий инструмент и приспособления. Управление ГПС осуществляют из центра управления.

Идея гибкого производства универсальна, так как позволяет подойти с единых позиций к вопросам совершенствования различных типов производств. В крупносерийном и массовом производстве с помощью ГПС можно решать задачу выпуска с одного конвейера изделий одного типа, но с определенными отличиями партий любого размера.

Дальнейшее развитие автоматизации идет по пути полной автоматизации всего производственного процесса в пределах завода.

В решении этой задачи существует проблема автоматизации и механизации ручного труда на вспомогательных операциях, сборочных операциях и ряде операций таких, как сварка, окраска, упаковка в тару и т.п.

Эти проблемы решают созданием промышленных роботов, в связи с чем в машиностроении в последние годы появилась новая отрасль – робототехника, которая успешно развивается.

Промышленные роботы заменяют человека в условиях вредной окружающей среды, освобождают его от выполнения тяжелого, утомительного и однообразного труда. Они позволяют наиболее полно использовать технологическое оборудование и повысить производительность труда. Промышленные роботы позволяют не только изменять характер производства, но и создавать, осваивать принципиально новые технологические процессы, не требующие участия человека.

Наиболее трудной оказалась автоматизация сборочных работ. Объясняется это тем, что при автоматическом соединении деталей необходимо техническими средствами воспроизвести сложный процесс ориентации деталей в пространстве, выполняемый руками человека. Процесс требует непрерывного изменения схем базирования и компенсации от-

клонений в относительном положении соединяемых деталей. Гибкость рук и органы чувств человека позволяют достаточно просто справиться с этой задачей. Но возложить ее на автомат оказалось делом сложным.

Примерами удачных решений в автоматизации сборочных работ являются автоматы для сборки шарико- и роликоподшипников, автоматические роторные линии для сборки втулочно-роликовых цепей и др. В настоящее время автоматическая сборка изделий ведется не только в массовом, но и серийном производстве с применением автоматических машин специального назначения и промышленных роботов с программным управлением. Однако уровень автоматизации сборочных работ далеко не достаточен, поэтому автоматизация сборочных работ в машиностроении представляет собой актуальную проблему, поскольку трудоемкость сборочных работ составляет 30...50 % от трудоемкости изготовления машины.

1.13.5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Организация производства оказывает значительное влияние на производительность труда. Нередко даже небольшие улучшения в организации производства могут существенно повысить его эффективность, поэтому этому вопросу следует уделять большое внимание.

На организацию производства в первую очередь влияет количество изделий, подлежащих изготовлению в единицу времени. Отсюда критерием выбора формы организации производственного процесса служит число изделий, подлежащих изготовлению, их номенклатура и трудоемкость.

В практике машиностроения существуют два вида производственных процессов: поточный и непоточный. Более эффективным является поточный вид вследствие высокой производительности труда, короткого цикла изготовления, упрощения планирования, учета и управления производством. В единичном, мелкосерийном и среднесерийном производствах, как правило, применяется непоточный вид производственного процесса и организационные формы в виде участка с групповой расстановкой оборудования, технологически замкнутого участка и предметно-замкнутого участка.

Организация производственных участков с групповым расположением оборудования эффективна для производства деталей широкой номенклатуры, изготавливаемых единицами или в небольших количествах. Оборудование в этом случае делят на группы по признаку одинакового назначения; заготовки обрабатывают партиями.

Например, есть участок фрезерных станков и есть участок токарных станков и т.д.; этими участками руководит мастер. Такая расстановка позволяет более полно загрузить оборудование, а недостатком являются многочисленные перемещения изделия по цеху от участка к участку до полного изготовления. После обработки изделия хранятся около станков или на специально оборудованных площадках. Изделия небольших размеров после выполнения каждой операции поступают в центральный или на промежуточный склад для учета и хранения. Изделие, прошедшее последнюю операцию и контроль, поступает на склад готовых изделий. Такую форму организации характеризуют невысокие технико-экономические показатели, сложность планирования, значительные перемещения изделий.

В этих условиях возникает противоречие между стремлением более полно загрузить станки и порядком поступления готовых деталей во времени на сборку в соответствии с требованиями технологических процессов сборки изделий и календарным планированием. Очень часто недозагруженность станка объясняется не столько техническими трудностями его загрузки, сколько ограничениями, накладываемыми требованиями сборки. Если пренебречь этими требованиями и загружать станки полностью, то появится необходимость в увеличении складских помещений, где готовые детали будут пролеживать, ожидая вызова на сборку. При такой организации производства исключается возможность применения поточной формы.

С увеличением количества деталей, подлежащих изготовлению в единицу времени, переходят к более совершенной организационной форме – технологически замкнутым участкам.

Организация технологически замкнутых участков предполагает группирование изделий по однородности служебного назначения, конструктивных форм и размеров. Под каждую группу таких изделий организуется участок, содержащий все виды оборудования, необходимого для полного изготовления каждого изделия в данной группе. Примером такой формы организации могут служить участки по изготовлению шпинделей, крепежа, зубчатых колес и т.п.

Оборудование устанавливается по возможности в последовательности, соответствующей ходу технологических процессов большинства деталей группы; это обеспечивается тем обстоятельством, что для однородных деталей можно использовать типовую технологию.

Таким образом, организационная форма замкнутых участков теоретически создает предпосылки для реализации поточных производствен-

ных процессов, что позволяет: улучшить организацию планирования и учета; детали проходят меньшую длину пути, сокращается время на перенастройку оборудования при переходе от обработки одной детали к другой, так как их технологические процессы близки; короче становится цикл изготовления; проще организовать контроль качества.

Технологическое оборудование на технологически замкнутых участках может связываться транспортными средствами, различного рода подъемно-транспортными устройствами. Все это в итоге дает возможность достигнуть более высоких технико-экономических показателей.

При дальнейшем увеличении выпуска изделий одной номенклатуры организуют **предметно-замкнутые участки**. На них полностью изготавливают сборочные единицы, например, двигатель, коробка скоростей, редуктор и т.п.

При дальнейшем увеличении количества выпускаемых деталей в единицу времени целесообразно организовывать производственный процесс по поточной форме в виде поточной линии.

Под поточным производственным процессом понимается непрерывность движения изготавливаемых изделий и равномерный их выпуск в единицу времени.

В таком идеальном представлении поточный производственный процесс можно встретить в отраслях с непрерывным циклом производства (например, при производстве нефтепродуктов в нефтепереработке, где производство является "бессерийным").

Поточный производственный процесс характеризуется:

- 1) прямооточностью, когда предмет труда движется поступательно от одной единицы оборудования к другой без возвратного движения;
- 2) непрерывностью движения предмета труда в процессе его изготовления;
- 3) ритмичностью, когда изделие в конце производственного процесса сходит через одинаковые промежутки времени.

Наивысший уровень поточности производственного процесса будет при наличии всех трех перечисленных свойств.

В машиностроительном производстве, являющимся, как правило, дискретным, трудно найти такой процесс. Наиболее близко к идеальной поточной форме приближаются процессы, реализуемые с помощью роторных линий.

Разновидностями поточной организации производства являются переменнo-поточная и непрерывно-поточная формы. Причем в последнее время начинает доминировать переменнo-поточная форма, отличающаяся

периодическим запуском на одном и том же оборудовании деталей нескольких наименований.

В поточных линиях оборудование расставляют по ходу технологических операций, что позволяет широко применять многостаночное обслуживание и наилучшим образом использовать производственную площадь. Все единицы оборудования связывают транспортными средствами для передачи заготовки; продолжительность каждой операции равна или кратна такту выпуска. При поточной организации производства нет необходимости в складах, за исключением небольших промежуточных заделов для компенсации изменений затрат времени на выполнение операций.

Поскольку поточная форма организации производственного процесса наиболее эффективна, естественно стремление использовать поточный метод в единичном и мелкосерийном производствах, что послужило причиной появления групповой технологии.

С другой стороны, в массовом производстве тоже наметились серьезные изменения, породившие тенденцию выпуска в массовом производстве одного и того же изделия попеременно партиями разных его модификаций. Эти изменения обусловлены необходимостью удовлетворять быстро меняющиеся запросы потребителей. Однако при этом возникает противоречие между желанием, с одной стороны, максимально быстро удовлетворять потребности потребителя, выпуская разные изделия, а с другой, – избежать перерывов в производственном процессе, изготавливая изделия крупными партиями. Таким образом, и в массовом производстве возникает проблема применения поточного метода.

Действительно, наблюдаемая в машиностроении тенденция ускорения смены выпускаемой продукции изменяет содержание массового производства, расширяя номенклатуру изготавливаемых изделий и тем самым приближая его по номенклатуре к серийному производству, а по количеству деталей, выпускаемых в единицу времени, – к массовому. Эти противоречивые условия и вызывают трудности осуществления производства по поточной форме.

В связи с этим, необходимо изыскивать пути широкого применения поточной формы не только в массовом, но и в серийном и даже единичном производствах.

Наблюдаемая в машиностроении тенденция ускорения смены выпускаемых изделий привела к тому, что начинает доминировать многономенклатурное разносерийное производство.

Степень широты номенклатуры изделий и размера серий на разных предприятиях могут существенно различаться. Например, на предпри-

ятиях массового производства сохраняются большие объемы выпуска изделий нескольких наименований, но с большим числом модификаций; на других предприятиях резко возросла номенклатура изделий при небольших объемах выпуска. Таким образом, среди современных предприятий трудно найти предприятие с постоянным типом производства (единичным, серийным, массовым).

Чтобы в новых условиях предприятие было бы конкурентоспособным, его производство должно отличаться высокой производительностью, гибкостью, мобильностью, т.е. быть способным быстро и с минимальными издержками переходить на выпуск новых изделий. В то же время традиционные организационные формы производственного процесса ориентированы на соответствующие типы производства и потому уже не могут обеспечить высокую эффективность производства в новых условиях.

Действительно, если, к примеру, в первом квартале требуется изготовить широкую номенклатуру изделий малыми сериями, а во втором квартале – меньшую номенклатуру средними сериями, то организационная форма производственного процесса, эффективная в первом квартале, не будет эффективной во втором квартале.

Таким образом, требуется поиск новых организационных форм производственного процесса, а для этого необходимо понимать преимущества и недостатки традиционных организационных форм.

Традиционные организационные формы в единичном производстве обеспечивают высокую гибкость, но с низкой производительностью, а в массовом производстве – высокую производительность при отсутствии гибкости. Новая организационная форма должна одновременно обеспечивать и высокую производительность, и гибкость производственного процесса [2].

Высокая производительность достигается посредством специализации производства, в основе которой лежит разделение труда и его рациональная организация, основанная на расчленении производственного процесса и специализации орудий труда.

Специализация бывает двух видов: предметная (СП) и технологическая (СТ). Последняя предполагает изготовление разнородных деталей по однородной технологии. Оба вида специализации направлены на достижение однородности труда с целью повышения его повторяемости и тем самым – с целью повышения производительности процесса.

При специализации производства важно точно определить предмет производства на каждом уровне производства – на уровне подотрасли

машиностроения, завода, цеха, рабочего места. Например, в авиастроении или станкостроении предметом производства являются любые самолеты или любые станки; на заводе фрезерных станков – только фрезерные станки; на уровне сборочного цеха – сборочные единицы, а на уровне механического цеха – детали; на уровне рабочего места (РМ) (например, по изготовлению деталей) – *совокупность изготавливаемых поверхностей* (СП). В частном случае это может быть одна поверхность или деталь, когда на одном РМ изготавливаются все поверхности детали, причем СП ограничена набором *наименований поверхностей* (НП), который, в свою очередь, ограничен для данного РМ возможностями технологического оборудования и оснастки.

Чтобы поднять уровень организации производства в современных условиях, необходим новый метод его организации, который разрешил бы противоречие между специализацией и гибкостью производства.

Рассмотрим этот вопрос на примере организации производства деталей. В основе этого метода [2] должно лежать закрепление за каждым рабочим местом ограниченного множества СП, близких по конструктивному оформлению. Тогда РМ будет специализировано по предметному признаку. В этом случае технологическое оборудование и оснастка должны подбираться не под методы обработки, а под технологию изготовления конкретных СП и позволит их специализировать в условиях даже единичного производства.

Чтобы так организовать производство, надо все возможное множество СП разбить на группы и под каждую группу организовать РМ, тогда получим состав РМ, с помощью которого можно изготовить любую деталь.

Проблема реализации такой организации производства заключается в случайном характере СП, так как СП формирует технолог при разработке технологических процессов. Это приводит к большому множеству СП, из которого многие СП никогда не будут реализованы на практике.

В результате это приведет к большому числу РМ с большими избыточными возможностями и в итоге производство станет неэффективным.

Проблема решается, если воспользоваться модульным представлением детали, когда она рассматривается как совокупность модулей поверхностей (МП). Тогда, в качестве СП, будет выступать один МП или группа, под которые уже известны технологии их изготовления и требуемое технологическое оборудование, и технолог, разрабатывающий технологический процесс, должен формировать СП только из этих МП.

При такой постановке вопроса вся технологическая подготовка РМ должна быть направлена на изготовление заранее известных и закрепленных за РМ модулей поверхностей (рис. 1.13.12, в).

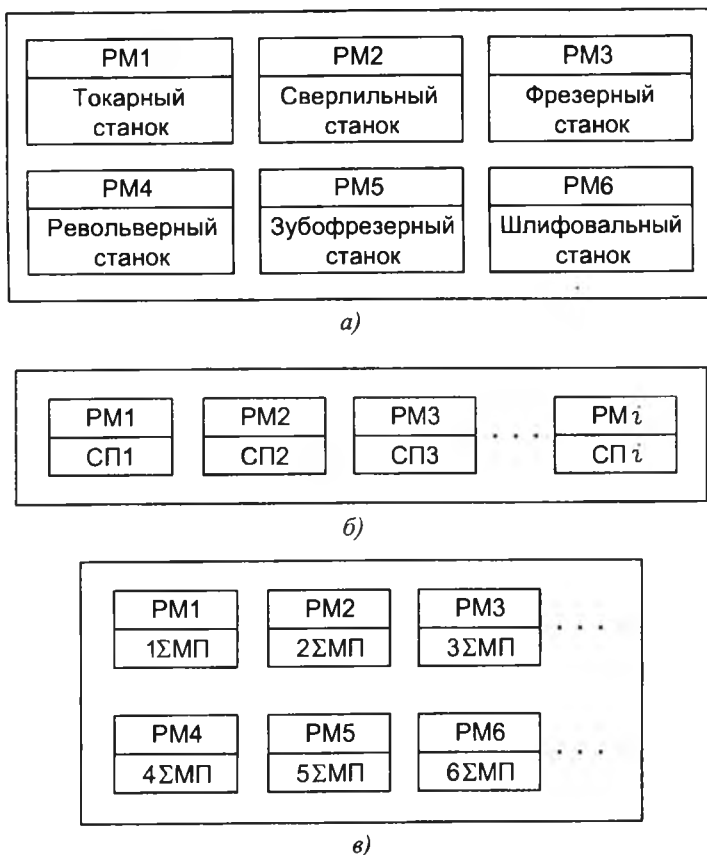


Рис. 1.13.12. Специализация и расстановка оборудования:

а – в традиционном единичном производстве; б – в традиционном массовом производстве; в – в условиях модульной технологии

Сущность нового метода организации производственного процесса заключается в следующем. Производственная программа выпуска деталей уточняется до уровня МП и представляется множеством МП, входящих в состав деталей, подлежащих выпуску. Изготовление детали осуществляется посредством модульного технологического процесса, который строится путем компоновки из модулей технологического процесса (МТИ) изготовления МП и состоит из операций, представляющих собой

один или сумму МТИ, изготовления одного или группы МП, входящих в состав СП. Это существенно снижает размер множества операций, их разнообразие и повышает их повторяемость. Таким образом, за каждым РМ закрепляется один или группа МП, а СП, изготавливаемое на операции, формируется только из этих МП.

Потребности в средствах технологического оснащения РМ (станках, инструментальных наладках, приспособлениях, контрольно-измерительных устройств) определяются с высокой точностью, так как каждое из них состоит из соответствующих модулей: модуля станка (МО), модуля инструментальной наладки (МИ), модуля приспособления (МПр), модуля контрольно-измерительного устройства (МКИ), подчиненных изготовлению МП по заранее известным МТИ.

Состав МП, закрепляемых за РМ, зависит, в первую очередь, от серийности производства. Например, в единичном и мелкосерийном производстве, где изготавливается широкая номенклатура деталей, целесообразно за РМ закреплять группу МП, близких по конструкции и техническим требованиям. В этом случае участок (цех) будет представлять собой группу РМ, охватывающих все МП, составляющие изготавливаемые детали. Тогда, чтобы изготовить ту или иную деталь, ее заготовка будет обрабатываться только на тех РМ, где изготавливаются МП, составляющие эту деталь.

В массовом и крупносерийном производствах за РМ закрепляется СП, состоящая из одного или нескольких МП в зависимости от разработанного модульного технологического процесса детали.

При закреплении за РМ определенных СП изменится характер специализации.

В единичном производстве специализация на уровне участка будет технологической так же, как и при традиционной организации производственного процесса, поскольку изготавливается широкая номенклатура деталей, но на уровне РМ специализация становится предметной, так как у заготовок разных деталей изготавливаются только те МП, которые закреплены за рабочим местом.

В серийном и массовом производствах специализация на обоих уровнях будет предметной, но в массовом производстве уровень специализации выше.

Организуя таким образом работу РМ, можно в одном производстве обеспечить одновременно и высокую производительность, и гибкость.

В условиях многономенклатурного разносерийного производства специализация РМ под изготовление МП придает производственному

процессу высокую гибкость, за счет обеспечения возможности заготовкам разных деталей проходить РМ разными маршрутами по РМ в соответствии с их модульным технологическим процессам без существенной переналадки технологических систем, поскольку на каждом РМ изготавливаются одни и те же МП независимо от изготавливаемой детали.

Каждое РМ должно быть специализировано таким образом, чтобы оно частично дублировало одно-два РМ по номенклатуре изготавливаемых МП. Это увеличит гибкость производства, так как позволит изменять маршрут движения заготовки в случае загруженности на данный момент следующего по маршруту обработки РМ, а в случае отказа технологического оборудования на каком-либо РМ позволит обойти его через другое РМ, не прерывая производственный процесс и сводя к минимуму заделы.

Высокая производительность достигается за счет специализации РМ, что позволяет применять прогрессивные методы обработки, характерные для крупносерийного и даже массового производства, совмещать переходы; при этом создаются предпосылки для применения поточного вида производственного процесса даже в условиях единичного производства.

Если в традиционном массовом производстве поточность предполагает сквозное прохождение заготовки по всему маршруту, то в единичном и мелкосерийном производствах сделать это не удастся вследствие следующих причин: 1) разные детали имеют разные маршруты изготовления, различными получаются и затраты подготовительно-заключительного и штучного времени; 2) через одни РМ проходит большее количество заготовок, а через другие – меньшее; 3) заготовки разных деталей движутся по разным маршрутам.

Применение модульных технологических процессов, закрепление МП за РМ, формирование СП из заранее известных МП создают предпосылки для внедрения поточного вида производственного процесса в многономенклатурном разносерийном производстве. Организация поточного производственного процесса в этом случае должна начинаться с установления обобщенных маршрутов движения заготовок.

Под обобщенным маршрутом движения заготовок будем понимать такую последовательность движения заготовок, при которой прохождение заготовок разных деталей через группу РМ осуществляется без возврата, т.е. обеспечивается прямоточность движения заготовок разных деталей.

Определяются обобщенные маршруты движения следующим образом. Множество деталей, подлежащих изготовлению, делится на группы

деталей по общности конструктивных форм, так как это в определенной степени предопределяет схожесть состава содержащихся в них МП.

Затем в каждой группе деталей выделяются типовые представители и под их изготовление разрабатываются модульные технологические процессы, после чего технологические процессы с одинаковыми или близкими маршрутами движения заготовок объединяются в группы, для которых устанавливается один обобщенный маршрут движения заготовок. При этом допускается в маршрутах пропуск одного или нескольких РМ при условии сохранения прямооточности движения заготовок.

На основе полученной группы обобщенных маршрутов движения заготовок определяется наиболее эффективная расстановка станков.

Для осуществления такой организации производственного процесса необходимо на разработку модульных технологических процессов накладывать ряд ограничений. Технолог при разработке технологических процессов обязан придерживаться таких маршрутных технологических процессов, которые обеспечивали бы перемещения заготовки по одному из обобщенных маршрутов движения, а технологические операции должны проектироваться таким образом, чтобы изготавливаемые на них СП состояли из одного или нескольких МП из числа закрепленных за РМ.

Наиболее сложно в условиях широкой номенклатуры изготавливаемых деталей и разной серийности их выпуска обеспечить непрерывность и ритмичность движения заготовок.

Ритмичность движения заготовок по РМ достигается через синхронизацию операций. Под синхронизацией в многономенклатурном разносерийном производстве в отличие от массового производства будем понимать одинаковую длительность операций технологических процессов разных деталей. Иными словами, синхронизация сводится к тому, чтобы на всех РМ операции осуществлялись одновременно и были одинаковыми или кратными по длительности независимо от того, какие детали изготавливаются.

Для обеспечения синхронизации и ритмичности движения заготовок надо управлять как разработкой модульных технологических процессов, так и самим производственным процессом в целом. К наиболее существенным факторам, выступающим в роли управляющих воздействий для достижения одинаковой длительности операций разных деталей, относятся состав МП, изготавливаемых на операциях, и их МТИ.

Итак, производственный участок (цех) рассматривается как технологическое поле, представляющее собой совокупность специализированных РМ. В этом поле от одного РМ к другому перемещаются предметы

труда в соответствии со своими маршрутными технологическими процессами.

В качестве примера на рис. 1.13.13 приведена схема организации производства деталей на принципах модульной технологии. Согласно этой схеме чертеж изготавливаемой детали представляется в модульном исполнении, модульный технологический процесс строится методом компоновки из МТИ, а обрабатывающая технологическая система комплектуется из модулей станка, инструментальной наладки, приспособления и контрольно-измерительного устройства.

Заготовки, поступающие на обработку, движутся от одного РМ к другому РМ без возврата в соответствии с изготавливаемыми МП и маршрутным технологическим процессом.

Организация производства таким образом позволит:

1) в несколько раз сократить трудоемкость технологической подготовки производства;

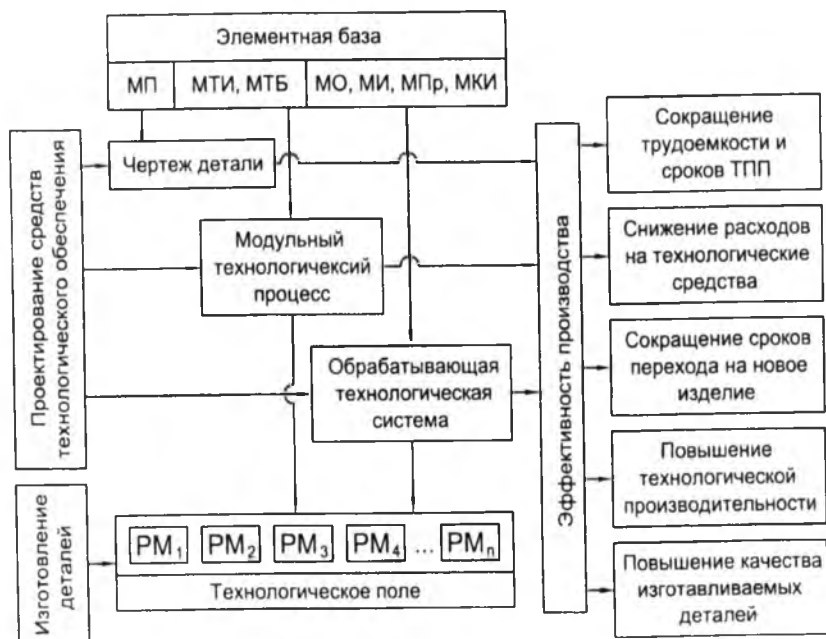


Рис. 1.13.13. Схема организации производства деталей на принципах модульной технологии

2) снизить расходы на технологическую оснастку за счет сокращения ее разнообразия и возможности перекомпоновки при переходе на изготовление других деталей;

3) снизить число наладок, настроек и их трудоемкость при переходе на изготовление новых деталей;

4) повысить производительность обработки при изготовлении деталей в условиях многономенклатурного разнoserийного производства за счет совмещения переходов, применения прогрессивных многоинструментных методов обработки, характерных для крупносерийного производства, сокращения затрат подготовительно-заключительного времени;

5) в условиях производства деталей крупными сериями быстро переходить на выпуск новых деталей за счет создания новых технологических средств методом компоновки из имеющихся модулей;

6) повысить качество изготовления деталей за счет построения их технологических процессов из апробированных модулей технологического процесса.

Изложенный метод организации производства может быть применен и в сборочном производстве машиностроительных изделий.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Способы сокращения расходов на материалы.
2. Чему равен коэффициент использования материалов?
3. Каким образом можно сократить расходы на заработную плату?
4. Как определяется возможное количество станков, обслуживаемых одним рабочим?
5. В чем разница между стандартизацией, унификацией и типизацией?
6. Что такое симплификация и агрегатирование?
7. В чем заключается системный подход в унификации объектов машиностроительного производства?
8. Перечислите наиболее важные требования к технологичности конструкции изделия.
9. В чем разница между механизацией и автоматизацией производственного процесса?
10. Что такое "гибкость" производства?

11. Что понимается под гибкой производственной системой?
12. В чем разница между участком с групповым расположением оборудования и технологически замкнутым участком?
13. Чем характеризуется поточный производственный процесс?
14. В чем разница между переменнo-поточной и непрерывно-поточной формами производственного процесса?
15. Преимущества и недостатки организационных форм производственного процесса в единичном производстве.
16. Преимущества и недостатки организационных форм производственного процесса в массовом производстве.
17. В чем разница между предметной и технологической специализацией?

Раздел 2

ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ

Решение задачи изготовления изделия начинается с технологической подготовки производства, представляющей собой комплекс работ по разработке технологических процессов, проектированию и изготовлению технологической оснастки и инструмента, установке и освоению нового оборудования, отладке всех операций и процесса в целом. Это наиболее трудоемкий и длительный этап технической подготовки предприятия к выпуску нового изделия.

Ядром технологической подготовки производства является разработка технологического процесса; основой является знание явлений и закономерностей технологического процесса, изложенных в первой части.

Разрабатываемый технологический процесс должен быть прогрессивным, строиться на основе современных достижений науки и техники, обеспечивать повышение производительности труда и качества изделий при наименьших трудовых затратах. Одновременно технологический процесс должен отвечать требованиям экологии и безопасности жизнедеятельности.

Технологический процесс изготовления изделия в общем случае представляет собой совокупность технологических процессов, его сборки и изготовления деталей. Поэтому в разделе излагаются основы разработки технологических процессов как сборки изделия, так и изготовления детали.

Глава 2.1

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ

2.1.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

К основным исходным данным относятся: 1) описание изделия, подлежащего изготовлению; 2) рабочие чертежи и технические требования на изделие и его элементы; 3) намеченный такт выпуска изделий; 4) ус-

ловия, в которых предполагается организовать изготовление изделий (новый или действующий завод); 5) территориальное расположение завода; 6) наличие кадров; 7) плановые сроки подготовки и освоения выпуска нового изделия и др.

Все эти данные необходимы для детального выяснения задачи, решаемой с помощью технологического процесса, и условий, в которых должны протекать его разработка и осуществление. Чем правильнее, точнее и яснее сформулирована задача и условия ее выполнения, тем быстрее и с меньшими затратами она решается.

Описание изделия должно содержать всю необходимую информацию, раскрывающую служебное назначение изделия, а технические требования и нормы точности должны соответствовать назначению изделия.

Опыт освоения многих изделий показал, что каждая неясность, недостаточно четкое понимание служебного назначения изделия заставляют вносить много изменений, иногда существенных, в конструкцию изделия в период подготовки ее производства и внедрения. Эти изменения технических требований или конструкций влекут за собой пересмотр технологических процессов, переделку конструкций технологической оснастки, перестановку оборудования и т.д. Результатом является удлинение сроков подготовки производства и освоения выпуска новых изделий.

Поэтому необходимо предельно ясно выявлять служебное назначение изделия, и что не менее важно, правильно его отражать в технических требованиях и различных нормах, которым должно отвечать новое изделие.

Количество изделий, намечаемых к выпуску в единицу времени и по неизменяемым чертежам, определяет выбор наиболее экономичного варианта технологического процесса, оборудования, инструмента, технологической оснастки, степени механизации, автоматизации и организационных форм.

Очень важно также знать все условия, в которых будет осуществляться технологический процесс. Если технологический процесс разрабатывается для проектируемого завода, то свобода выбора варианта технологического процесса, оборудования, инструмента значительно больше, чем в случае разработки технологического процесса на действующем заводе. В последнем случае на выбор варианта технологического процесса оказывает существенное влияние имеющееся оборудование, иногда даже его загрузка, перспектива получения нового, производственные возможности инструментального цеха, цеха приспособлений, возможности кооперирования по этим вопросам с другими заводами и т.д.

Месторасположение завода необходимо знать для выяснения вопросов кооперирования с другими заводами по изготовлению заготовок ряда деталей (литых, штампованных, кованных), получения готовых деталей и сборочных единиц (крепежных, подшипников, электрооборудования, муфт, насосов, электродвигателей и др.).

2.1.2. ОБЪЕКТ ПРОИЗВОДСТВА

Качество разработки технологического процесса зависит от того, насколько полно в конструкторской документации дано описание изделия, подлежащего изготовлению. Описание изделия должно быть не только подробным, но и понятным.

Как уже отмечалось в гл. 1.4.5, в конструкторской документации на изделие часть информации, необходимая технологу, представляется в неявном виде, а некоторая отсутствует. Это приводит не только к увеличению затрат времени на изучение изделия, технических требований, но и к разному пониманию технологом и конструктором конструкции изделия. Все это сказывается на качестве и сроках разработки технологического процесса.

В связи с этим при разработке конструкторской документации конструктор должен отражать информацию об изделии, рассматривая его не только как объект эксплуатации, но и как объект производства, причем эта информация должна быть представлена в удобном виде.

В дополнении к информации об изделии, содержащейся в конструкторской документации, технологу необходимо представить структуру изделия как совокупность сборочных единиц и деталей, показать, какие детали выступают в качестве базирующих, привести перечень посадок, схемы размерных цепей и их характеристики, характер соединений деталей, уровень требований к качеству соединений и деталей, характеристики обрабатываемости материалов деталей и др. Вся эта информация должна быть представлена в компактной форме и обозримом виде, вычлененная из конструкторской документации с устранением излишней информации.

С этой целью предлагается в дополнение к традиционной конструкторской документации включать графы, отражающие структуру изделия как совокупность сборочных единиц и деталей; систему конструкторских размерных связей, сводные таблицы посадок соединений, характеристик обрабатываемых материалов, модулей соединений, модулей поверхностей и др.

Если дополнительная информация не представлена конструктором, то ее следует подготовить технологу в процессе изучения конструкторской документации.

Описание структуры изделия как сборочной единицы включает граф сборочных единиц и деталей изделия, граф деталей изделия и МС, граф МП изделия, методика построения которых приведена в гл. 1.4.

Граф сборочных единиц и деталей изделия необходим для разработки общей сборки изделия и его сборочных единиц.

Когда изделие рассматривается как объект эксплуатации, оно представляется совокупностью элементов, выделенных по функциональному назначению, — агрегаты, устройства, механизмы и т.п., которые не всегда выступают в роли сборочных единиц.

Конструкция изделия как объекта производства представляется совокупностью сборочных единиц разного уровня, в качестве которых могут выступать в частном случае его отдельные части функционального назначения, и деталей.

Сборочная единица первого уровня является простейшей, содержащей только детали; в сборочную единицу второго уровня входит одна и более сборочных единиц первого уровня и детали и т.д.

В каждой сборочной единице содержится базирующая деталь, определяющая положение всех составляющих данную сборочную единицу деталей, а в сборочных единицах второго и более высокого уровня содержатся сборочные единицы низшего уровня.

Построение графа начинается с определения базирующей детали или базирующей сборочной единицы изделия, роль которой обычно выполняют рамы, станины, основания и т.п.

Граф показывает, какие сборочные единицы и детали входят в состав изделия, какие детали выступают в роли базирующих, из скольких уровней состоит структура изделия и какие сборочные единицы и детали располагаются на каждом уровне. Такой граф наглядно показывает структуру изделия и позволяет достаточно строго формализовать ее описание, что важно для создания различного рода информационно-поисковых систем и САПР сборочных технологических процессов.

Изучение графа позволяет не только быстро понять конструкцию изделия, но и вскрыть ошибки в конструкции, определить уровень технологичности изделия. К графу следует прикладывать таблицу с указанием базирующих деталей, номенклатуры сборочных единиц и их количество, а также их характеристик (габаритные размеры, масса и др.).

Если граф содержит сборочные единицы второго и более высокого уровня, то необходимо построить соответственно и графы этих сборочных единиц, которые обозначаются как графы сборочных единиц соответствующего уровня.

Граф деталей изделия раскрывает структуру изделия на уровне деталей, показывая базирующие детали, взаимосвязи между деталями, уровень точности относительного положения деталей, тип, характер и качество соединений деталей, выраженные с помощью модулей соединения. На основании информации, содержащейся в этом графе, заполняется таблица, в которой указываются перечень наименований деталей, количество каждого наименования, вид МС, посадка, материалы соединяемых деталей и др.

Граф модулей поверхностей изделия строится на базе предыдущего графа путем замещения в нем деталей графами МП, входящими в их состав. В сложных изделиях число деталей может достигать сотен и даже тысяч деталей, поэтому для построения графа МП таких изделий требуется большая площадь. В таких случаях, поскольку связи между деталями показаны на графе деталей, следует строить граф МП фрагментами в виде графов МП отдельно для каждого наименования детали.

Граф МП показывает по каждой детали: номенклатуру и количество МП каждого наименования; МП, выступающие в качестве конструкторских баз; уровень точности относительного положения МП, конструктивные характеристики последних и др.

С помощью графа МП и конструкторской документации заполняется таблица деталей изделия с указанием состава МП, их характеристик, включающих конструкцию, размеры, точность, качество поверхностного слоя.

На основании двух последних графов строятся гистограммы МП и МС, которые показывают номенклатуру МС, МП, количество каждого наименования и общее число МС и МП.

Конструкторские размерные связи изделия являются важным элементом, характеризующим изделие. Вскрытие размерных цепей в конструкции изделия всегда является задачей достаточно сложной, трудоемкой, требующей глубокого понимания конструкции изделия, его работы. К сожалению, часто в конструкторской документации размерные цепи или отсутствуют, или приводятся частично.

В то же время знание конструкторских размерных цепей изделия технологу необходимо для проведения размерного анализа. С его помощью устанавливаются методы достижения точности, заложенные в кон-

струкции, ошибки в простановке размеров и назначении допусков, трудности, которые могут возникнуть при обеспечении заданных технических требований в процессе сборки изделия и изготовления деталей. Это позволяет оценить уровень технологичности конструкции изделия.

Наличие графов деталей и МП существенно упрощают задачу выявления и построения размерных цепей и не требуют для этого сборочных чертежей изделия (см. гл. 1.4). Процесс выявления и построения размерных цепей становится простым и сравнительно легко поддается автоматизации, что способствует широкому применению размерного анализа для изучения конструкции изделия.

На основе построенных размерных цепей заполняется сводная таблица характеристик размерных цепей, включающих количество составляющих звеньев с указанием наличия компенсирующих звеньев, общих звеньев, допусков замыкающих звеньев и др.

В заключение можно отметить, что с помощью графов и приведенных таблиц, технолог получает достаточно подробное и наглядное представление об изделии как объекте производства. Наличие такой информации и элементной базы технологического обеспечения позволяют технолог в короткие сроки изучить изделие, оценить его технологичность, определить ожидаемую трудоемкость сборки изделия и изготовления его деталей, потребности в средствах технологического оснащения. В качестве примера такой информации можно привести графы бурового трехшарошечного долота (рис. 1.4.27 – 1.4.39).

В связи с описанием изделия как объекта производства следует остановиться еще на одной задаче, имеющей важное значение и касающейся в первую очередь тех предприятий, на которых выпускается достаточно широкая номенклатура изделий. На таких предприятиях и даже на предприятиях, выпускающих однотипную продукцию (например, станкозаводах, производящих разные станки), в разных изделиях часто содержатся одинаковые детали.

Однако эти детали в документации имеют разные названия и номера, а поскольку, как правило, разработку технологии изготовления разных изделий ведут разные технологи, то под изготовление одинаковых деталей дублируется полная технологическая подготовка. Поэтому задача идентификации деталей, их однозначное описание независимо от того, в каком изделии они участвуют, представляется весьма актуальной задачей.

Проблема решения задачи состоит в том, что деталь описывается достаточно большим числом характеристик, влияющих на технологию изготовления детали. С другой стороны, многовариантность технологи-

ческого процесса по изготовлению одной и той же детали еще больше усложняет решение этой задачи.

Представление чертежа детали совокупностью МП существенно упрощает идентификацию деталей за счет сокращения числа характеристик детали и возможности использования типовых МП.

2.1.3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Разработка технологического процесса включает следующие *этапы*:

- 1) ознакомление со служебным назначением изделия;
- 2) изучение и критический анализ технических требований и различных норм (точности, производительности, КПД, расхода горючего), определяющих служебное назначение изделия;
- 3) ознакомление с намечаемым количественным выпуском изделия в единицу времени и общим количеством выпуска по неизменяемым чертежам;
- 4) изучение рабочих чертежей изделия и их критический анализ с точки зрения возможности выполнения изделием его служебного назначения, намечаемых конструктором способов получения точности, требуемой служебным назначением, выявления и исправления допущенных ошибок;
- 5) разработка технологического процесса последовательности общей сборки изделия, обеспечивающего возможность выполнения им служебного назначения, и выявление требований технологии общей сборки к конструкции изделия, сборочным единицам и деталям;
- 6) анализ служебного назначения сборочных единиц и разработка последовательности технологического процесса сборки сборочных единиц, их регулировки и испытания; выявление требований технологии сборки к деталям, составляющим сборочные единицы, и к конструкции сборочных единиц;
- 7) изучение служебного назначения деталей, критический анализ технических требований и требований к деталям со стороны технологии, выявление требований к конструкции деталей;
- 8) выбор наиболее экономичного технологического процесса получения заготовок с учетом требований служебного назначения деталей и намечаемого количественного выпуска в единицу времени и по неизменяемым чертежам;

9) разработка наиболее экономичного технологического процесса изготовления деталей при намеченном количестве выпуска в единицу времени и по неизменяемым чертежам; внесение коррективов в технологические процессы и, если необходимо, в конструкцию деталей;

10) планировка оборудования и рабочих мест, подсчет загрузки и внесение необходимых коррективов в технологический процесс;

11) проектирование и изготовление инструмента, технологической оснастки и оборудования; опробование их и внедрение в производство;

12) внесение в технологический процесс всех коррективов для исправления ошибок и недочетов, обнаруженных во время внедрения технологических процессов в производство.

Изучение служебного назначения изделия. Перед началом разработки технологического процесса технологу необходимо детально изучить и понять служебное назначение изделия, намечаемого к изготовлению. Изучение формулировки служебного назначения изделия должно сопровождаться его критическим анализом с целью установления – насколько полно отражена задача, под решение которой создается изделие.

Первоначально служебное назначение изделия формулируется заказчиком при разработке технологического процесса изготовления продукции с помощью этого изделия и уточняется при оформлении заказа на проектирование изделия. Для конструктора формулировка служебного назначения изделия является исходным документом, который впоследствии прилагается к чертежам изделия. Со стороны технолога, приступающего к разработке технологии изготовления изделия и являющегося лицом, ответственным за сдачу готового изделия заказчику, помимо изучения требуется критическая оценка формулировки служебного назначения изделия.

Необходимость в критической оценке объясняется важностью того обстоятельства, что задачи, которые должны быть решены с помощью создаваемого изделия, должны быть определены правильно. Если ошибки или неточности, допущенные при конструировании и изготовлении изделия еще как-то могут быть устранены, то ошибки в определении служебного назначения в его основном замысле не поддаются исправлению и нередко ведут к неполноценности или негодности конструкции. На практике нередки случаи, когда уточнения служебного назначения изделия на стадии проектирования технологического процесса требовали значительных конструктивных доработок, что способствовало повышению качества изделия.

Анализ технических требований и норм точности. Технические требования и нормы точности являются результатом преобразования качественных и количественных показателей служебного назначения изделия в показатели размерных связей его исполнительных поверхностей. Так как технические требования и нормы точности являются отражением служебного назначения изделия, то, приступая к разработке технологического процесса, необходимо глубоко понимать смысл тех требований, которые предъявляются к качеству изготавливаемого изделия, и иметь уверенность в том, что они разработаны правильно.

Разработка технических требований и норм точности на создаваемое изделие является сложной задачей. Нередки случаи, когда конструкторы задают технические требования в неявном виде. Технологам в таких случаях приходится уточнять и даже дополнять недостающие технические требования или переводить на язык цифр условия, заданные лишь на качественном уровне.

Анализ соответствия технических требований и норм точности служебному назначению изделия основывается: на теоретических исследованиях физической сущности явлений, сопутствующих работе изделия; на проведении экспериментов на опытных образцах, макетах или первых экземплярах изделия; на изучении опыта эксплуатации изделия аналогичного типа; на основании опыта, которым обладает технолог, выполняющий анализ.

Сформулированные технологом предложения по уточнению как служебного назначения, так и технических требований должны быть доведены до сведения конструктора и заказчика.

Анализ соответствия норм точности и технических требований служебному назначению изделия, так же, как и разработка их при конструировании, предполагает решение прямой задачи. Только переходя от служебного назначения изделия к техническим требованиям и нормам точности, можно понять логику их разработки и установить правильность и достаточность. Поэтому технолог, как и конструктор, должен владеть методом разработки норм точности и технических требований к изделию.

Исходными данными для установления норм точности изделия могут являться требования к качеству продукции, которую должно производить изделие, производительности и долговечности изделия и др. В конечном счете соблюдение этих требований зависит от точности формы, размеров, относительного положения и движения исполнительных

поверхностей изделия, т.е. от точности размерных и кинематических связей исполнительных поверхностей.

Намечаемый выпуск изделий. Перед разработкой технологического процесса изготовления изделия необходимо знать: 1) намечаемый выпуск изделий в единицу времени (в год, квартал, месяц); 2) общее количество изделий, намечаемых к изготовлению по неизменяемым чертежам, или календарный промежуток времени, в течение которого намечается выпуск изделий по данным чертежам.

Эти данные требуются для выбора наиболее экономичных вариантов технологических процессов, видов оборудования, инструмента, объектов технологической оснастки, организации технологического процесса, степени его механизации и автоматизации.

В процессе разработки технологического процесса нередко приходится несколько изменять намечаемый выпуск изделий в единицу времени в ту или иную сторону. Объясняется это тем, что при намеченном выпуске часть оборудования может остаться недоиспользованной вследствие его некомплектности, что снижает основные технико-экономические показатели.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные данные для разработки технологического процесса изготовления изделия.
2. Что входит в состав описания изделия как объекта производства?
3. Что содержит граф изделия?
4. Что содержит граф сборочной единицы первого уровня?
5. Чем отличается граф сборочной единицы второго уровня от графа сборочной единицы первого уровня?
6. Что показывает граф деталей изделия?
7. Что показывает граф МП детали?
8. Какую цель преследует размерный анализ конструкций изделия?
9. Перечислите основные этапы последовательности разработки технологического процесса изготовления изделия.

Глава 2.2

ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ИЗДЕЛИЯ

Сборка является одним из заключительных этапов изготовления изделия, в котором сходятся результаты всей предшествующей работы, проделанной конструкторами и технологами по созданию изделия. Качество изделия и трудоемкость сборки во многом зависят от того, как понято конструктором и воплощено в конструкции служебное назначение изделия, как установлены нормы точности, насколько эффективны выбранные методы достижения требуемой точности изделия и как отражены эти методы в технологии изготовления изделия.

Технолог, разрабатывающий технологический процесс сборки изделия, должен: отчетливо представлять задачи, для решения которых создается изделие; понимать связи, посредством которых изделие должно выполнять предписанный ему процесс; обеспечить с требуемой точностью все необходимые связи в изделии соответствующим построением технологического процесса его изготовления, предъявив требования сборки к технологии изготовления деталей и контролю их точности.

К исходным данным для разработки технологического процесса сборки относятся: программа выпуска изделия; описание изделия как объекта производства, включая конструкторскую документацию; объем кооперации и другие данные, входящие в состав рассмотренной выше исходной информации. Для действующих и реконструируемых предприятий к исходным данным также относятся данные об имеющихся сборочном оборудовании и оснастке, производственных площадях и т.п.

Характер сборочного процесса во многом зависит от такта сборки. Такт сборки представляет собой интервал времени, через который производится сборка изделий определенного наименования, типоразмера и исполнения. При заданном режиме работы сборочного производства такт сборки T зависит от числа собираемых изделий за определенный промежуток времени:

$$T = F/N,$$

где F – фонд времени (годовой, месячный, сменный), ч; N – программа выпуска изделий за тот же промежуток времени, шт.

Номинальный (расчетный) годовой фонд времени F_n рабочего места сборщика равен 2070, 4140 и 6210 ч соответственно для работы в одну, две и три смены. Действительный годовой фонд времени F_d работы сборочного оборудования $F_d = F_n K_n$, где K_n – коэффициент, учитывающий потери времени на ремонт сборочного оборудования. Для неавтоматизи-

рованного сборочного оборудования, принимая K_n равным 0,98; 0,97 и 0,96, получим соответственно значения F_d 2030; 4015 и 5965 ч для работы соответственно в один, две и три смены; для автоматизированного оборудования значения F_d будут соответственно равны 1950; 3810 и 5590 ч (при коэффициентах потерь 0,94; 0,92 и 0,90).

Разработка технологического процесса сборки изделия включает изучение служебного назначения изделия, его конструкции, технических требований, выбор вида и организационной формы производственного процесса, методов сборки, определение последовательности соединения деталей и сборочных единиц, выбор методов регулирования и контроля качества сборки, выбор оборудования и средств сборки.

2.2.1. АНАЛИЗ СЛУЖЕБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ И ИЗУЧЕНИЕ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

Анализ служебного назначения заключается в оценке того, насколько полно оно отражает задачу, решаемую с помощью данного изделия. В служебном назначении изделия должны содержаться качественные и количественные характеристики процесса, для выполнения которого предназначено изделие и условия его протекания. В качестве примера рассмотрим служебное назначение универсального токарно-винторезного станка повышенной точности.

В проспекте на станок приводится информация, состоящая из двух частей: назначение станка и его основные данные.

Назначение: *"станок предназначен для выполнения всевозможных видов токарной обработки металлов, включая нарезание метрической, дюймовой, модульной и питчевой, одно- и многозаходных резьб. По заказу станок оснащается: линейкой конусной, люнетами подвижным и неподвижным, поводковым, трехкулачковым и четырехкулачковым патронами, планшайбой диаметром 450 мм, вращающимся центром Морзе 5, барабаном упоров, резцедержателем задним, лампой местного освещения, передним ограждением суппорта, приводом ускоренных перемещений каретки".*

Основные данные:

Наибольший диаметр обработки, мм:	
над станиной	450
над суппортом	260
Диаметр отверстия в шпинделе, мм	80
Длина обрабатываемого изделия, мм	1500
Размер центра в пиноли задней бабки	Морзе 5
Количество скоростей шпинделя	18

Частота вращения шпинделя, об/мин	31,5...1600
Подача, мм/об:	
продольная	0,05...2,8
поперечная	0,025...1,4
Пределы шагов нарезаемых резьб:	
метрической, шаг в мм	0,25...56
дюймовой, число ниток на 1"	112...0,5
модульной, шаг в модулях	0,25...56
питчевой, шаг в питчах	112...0,5
Точность геометрической формы цилиндрической поверхности образца – постоянство диаметра, мм:	
в поперечном сечении	0,005
в любом сечении	0,012
Шероховатость поверхности после чистовой обработки	Ra 1,25
Плоскостность торцевой поверхности, мм	0,010
Точность шага резьбы, мм	0,025
Мощность электродвигателя главного привода, кВт	5,5
Габариты станка, мм	2915×
	×1150×
	×1420
Масса станка, кг	2500

Если учесть, что служебное назначение станка должно отражать характеристики предмета труда, качество выпускаемой продукции, условия работы станка, то к сформулированному в проспекте назначению станка имеется ряд замечаний.

Для того, чтобы создать работоспособный станок, надо знать, какие изделия он предназначен изготавливать, какими методами, с какими скоростями, нагрузками, какое качество изделия должно быть достигнуто и др., и наконец, в каких условиях должен работать станок.

В приведенной в проспекте формулировке служебного назначения не указаны габаритные размеры заготовок, марки и характеристики материалов обрабатываемых заготовок (например, можно ли обрабатывать заготовки из закаленной стали; при каких максимальных нагрузках может работать станок, при каком температурном режиме и других условиях, в которых должен работать станок?).

Уровень точности изготавливаемых деталей должен быть включен в служебное назначение станка, а не в основные данные. В них должны быть указаны только те данные, которые обеспечивают выполнение служебного назначения.

Наличие этих данных в формулировке служебного назначения позволяет оценить пригодность заложенной в конструкции станка кинематической схемы, его качественный уровень (прочность, теплостойкость, точность и т.д.) и др.

Таким образом, приведенное назначение станка неполно отражает решаемую задачу, часть которого записана в основных данных. С учетом замечаний служебное назначение станка следовало бы сформулировать следующим образом:

"Станок предназначен для обработки заготовок длиной до 1500 мм и диаметром до 450 мм из конструкционных незакаленных сталей, чугуна, цветных металлов методом точения и нарезания резцом цилиндрических, дюймовых, модульных, питчевых, одно- и многозаходных резьб с пределами шагов: у метрических (в мм) 0,25...56, у дюймовых число ниток на 1" 112...0,5, у модульных шаг в модулях 0,25...56, у питчевых шаг в питчах 112...0,5; с точностью геометрической формы цилиндрической поверхности образца, мм:

Постоянство диаметра в сечении:

поперечном	0,005
любом	0,012
Шероховатость поверхности, не более	Ra 1,25
Плоскостность торцевой поверхности	0,01 мм
Точность шага резьбы, мм	0,025

Обработка на станке должна производиться с допустимой скоростью резания (в проспекте не указана), с подачами, величины которых находятся в пределах:

Продольная, мм/об	0,05...2,8
Поперечная, мм/об	0,025...1,4

Станок может работать с использованием конусной линейки, подвижного и неподвижного люнета, поводкового, трехручачкового и четырехручачкового патронов, планшайбы диаметром 450 мм, вращающегося центра Морзе 5, барабана упоров, заднего резцедержателя".

Эту формулировку следовало бы дополнить значениями предельных нагрузок и рядом эксплуатационных характеристик и условий, которым должен отвечать станок и которые отсутствуют в проспекте. Что касается основных технических характеристик станка, то они должны в первую очередь включать такие показатели, как точность положения и перемещений рабочих органов, требуемая частота вращения шпинделя, обеспечивающая заданную скорость резания, кинематическую схему с ее характеристиками, обеспечивающими заданные методы обработки, другие качественные показатели станка и т.д.

2.2.2. АНАЛИЗ СООТВЕТСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ, НОРМ ТОЧНОСТИ СЛУЖЕБНОМУ НАЗНАЧЕНИЮ ИЗДЕЛИЯ

В процессе анализа служебного назначения изделия устанавливается перечень технических требований к изделию, обеспечивающих выполнение его служебного назначения. Далее устанавливаются качественные и количественные связи между показателями служебного назначения и техническими требованиями на изделие. Аналогичные задачи решаются не только в отношении изделия в целом, но и каждого его устройства, механизма, детали.

Рассмотрим установление связей между показателями служебного назначения и техническими требованиями на изделие на примере шестеренного насоса. В п. 1.2.3 изложено служебное назначение шестеренного насоса (см. рис. 1.2.7), которое должно обеспечивать производительность подачи масла под давлением 0,6 МПа не менее 30 л/мин при шуме не более 85 дБ с заданной долговечностью. К техническим требованиям насоса, обеспечивающим заданную его производительность, относятся величины радиального, бокового и торцового зазоров, поскольку фактическая подача масла

$$Q_{\Phi} = Q_{\Gamma}n - Q_{\gamma} - Q_{\text{вс}},$$

где Q_{Γ} – теоретическая производительность насоса за один оборот зубчатых колес, в л/мин; n – частота вращения зубчатых колес, с^{-1} (равна 39 с^{-1}); Q_{γ} – утечка масла, л/мин; $Q_{\text{вс}}$ – потери при всасывании, л/мин.

При нагнетании возможны утечки масла через перечисленные выше зазоры:

$$Q_{\gamma} = Q_{\gamma\rho} + Q_{\gamma\text{з}} + Q_{\gamma\Gamma},$$

где $Q_{\gamma\rho}$ – утечка через радиальные зазоры между зубьями колеса и корпусом, л/мин; $Q_{\gamma\text{з}}$ – утечка, обусловленная неплотностью контакта зубьев, л/мин; $Q_{\gamma\Gamma}$ – утечка через торцовые зазоры между корпусом и зубчатыми колесами, л/мин.

Максимальное значение зазоров и вызываемые ими утечки приведены в табл. 1.2.1.

Теперь необходимо установить, соответствуют ли требованиям служебного назначения максимальные значения зазоров, заданные на чертежах.

Потери при всасывании, одной из главных причин которых является разрежение во всасывающей камере насоса и неполное заполнение межзубовых впадин: $Q_{\text{вс}} = 4,83 \text{ л/мин}$.

Учитывая, что при размерах зубчатых колес и корпуса, указанных в чертежах, производительность насоса с учетом зазоров:

$$Q_{\Gamma}n = 0,01785 \times 2350 = 41,95 \text{ л/мин},$$

можно ожидать, что производительность насоса:

$$Q_{\text{ожд}} = 41,95 - 6,73 - 4,83 = 30,39 \text{ л/мин.}$$

Следовательно, наибольшие допустимые зазоры установлены правильно.

Дополнительно к насосу предъявляются и другие требования: в собранном насосе при прокручивании от руки зубчатые колеса должны вращаться плавно; собранный насос должен быть чистым; его зубчатые колеса должны работать плавно и бесшумно. Насос следует подвергнуть испытаниям на специальной установке в течение 3...4 мин.

Требования, касающиеся легкости и плавности, а также бесшумности зубчатых колес заданы в неявной форме, поэтому формулировку первого из них следует заменить следующей: "В окончательно собранном насосе приводной вал должен свободно провертываться от руки, при этом крутящий момент, требующийся для поворота приводного вала, не должен превышать $10...15 \text{ кН} \cdot \text{м}$ ($10...15 \text{ кгс} \cdot \text{см}$)". Второе условие следует сформулировать так: "Уровень звукового давления (шума) при работе насоса под нагрузкой не должен превышать 85 дБ".

В нормы точности на насос, заданные чертежом, следует внести еще одно уточнение: для свободного вращения зубчатого колеса на зазор между корпусом и торцом ведомого зубчатого колеса привода следует установить допуск; вполне достаточен зазор 0,1 мм, который следует ограничить пределами 0,1...0,5 мм.

2.2.3. ВЫБОР ВИДА И ОРГАНИЗАЦИОННОЙ ФОРМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ

На основе изучения назначения изделия, его сборочных и рабочих чертежей, а также намеченного объема выпуска изделия в целом и его сборочных единиц выбирают вид и организационную форму процесса сборки. На рис. 2.2.1 показаны возможные организационные формы производственного процесса сборки.

По виду производственного процесса сборка может быть поточной и непоточной, каждую из которых разделяют на стационарную и подвижную. Поточную подвижную сборку осуществляют с периодическим и непрерывным движением собираемого объекта. При большом числе подлежащих изготовлению изделий или их сборочных единиц следует выявить экономичность использования поточной сборки. Если конструкция изделия обладает достаточной жесткостью базирующей детали и сравнительно небольшой массой, то целесообразно выбрать подвижную сборку с непрерывным перемещением собираемого изделия. В противном случае



Рис. 2.2.1. Виды (поточная и непоточная) и организационные формы производственных процессов сборки изделия

следует остановиться на подвижной сборке с периодическим перемещением собираемого изделия.

Изделия большой массы при относительно небольшом их числе экономично собирать с использованием поточной сборки с периодически перемещающимися бригадами рабочих от одного собираемого объекта к другому.

С уменьшением числа изделий, подлежащих изготовлению, когда использование поточной сборки становится неэкономичным, следует применять непоточную сборку с перемещающимися объектами. При единичном изготовлении изделий или небольшом их числе используют непоточную стационарную сборку.

Непоточная стационарная сборка характеризуется неизменным положением собираемого объекта на одном рабочем месте, которое оснащают необходимой оснасткой, и сборку выполняет один рабочий или бригада. Цикл сборки увеличивается, так как рабочие в большинстве случаев вынуждены работать последовательно. Неподвижность объекта позволяет свести к минимуму влияние на точность изделия упругих деформаций при недостаточно жесткой базирующей детали.

Для облегчения труда рабочие места или стенды обычно оборудуют универсальными приспособлениями и подъемно-транспортными средствами. Трудности организации ритмичной работы при работе бригадой обусловлены изменениями трудоемкости, цикла сборки, что порождает неравномерность ритма выпуска изделий.

Число рабочих мест или стендов для параллельной сборки одинаковых объектов

$$\gamma_0 = (T_0 - T_c)/T,$$

где T_0 – расчетная трудоемкость всех переходов сборки одного объекта; T_c – расчетная трудоемкость переходов, выполнение которых совмещено во времени с другими; T – расчетный такт сборки.

Непоточную стационарную сборку экономично использовать в единичном и мелкосерийном производствах. С увеличением числа собираемых объектов целесообразно переходить к непоточной подвижной сборке.

Непоточная подвижная сборка характеризуется тем, что собираемый объект перемещается от одного рабочего места к другому. Сборочные операции на каждом рабочем месте выполняют рабочий или бригада рабочих. При такой сборке значительно изменяется продолжительность операции, в связи с чем предусматривают межоперационные заделы.

Число рабочих мест, которые последовательно должен пройти собираемый объект,

$$q_1 = \frac{T_0 - T_c}{(T - t_n) \gamma_1},$$

где t_n – расчетное время, необходимое для перемещения собираемого объекта от одного рабочего места до последующего; γ_1 – число параллельных потоков, необходимых для параллельной сборки одинаковых собираемых объектов, в зависимости от объема выпуска;

$$\gamma_1 = \frac{T_{\text{оп нб}} + t_n}{T},$$

где $T_{\text{оп нб}}$ – продолжительность наиболее длительной сборочной операции.

Рабочие места оборудуют верстакami, стеллажами для сборочных единиц и деталей, монтажно-сборочным и контрольно-измерительными инструментами, транспортными средствами типа роликового конвейера, тележками различного рода. Непоточную подвижную сборку экономично использовать в серийном производстве.

Поточная стационарная сборка характеризуется тем, что собираемые объекты остаются на рабочих местах, а рабочие одновременно переходят от одних собираемых объектов к другим через определенные промежутки времени. Каждый рабочий выполняет определенную операцию. Число рабочих или бригад

$$q_2 = \frac{T_0 - T_c}{(T - t_p) \gamma_2},$$

где t_p – расчетное время для перехода рабочих от одного собираемого объекта к другому; γ_2 – число параллельных потоков,

$$\gamma_2 = \frac{T_{\text{оп.нб}} + t_p}{T}.$$

Основным преимуществом поточной стационарной сборки является работа с установленным тактом выпуска, что позволяет достигнуть высокого ритма выпуска изделий, короткого цикла сборки, высокой производительности труда.

Поточную стационарную сборку экономично использовать в серийном производстве изделий, отличающихся недостаточной жесткостью базирующихся деталей, большими размерами и массой (например, автобусы, тяжелые станки и т.п.). При дальнейшем увеличении объема выпуска изделий и сборочных единиц экономичной становится поточная подвижная сборка.

Поточная подвижная сборка характеризуется тем, что собираемый объект перемещается непрерывно или периодически через равные промежутки времени. Для перемещения собираемых объектов используются различного рода конвейеры: ленточные, цепные, штанговые, рамные и др.

При поточной сборке каждую рабочую позицию или участок, располагаемый вдоль конвейера, оборудуют всеми приспособлениями для сборки, сборочно-монтажным и измерительным инструментом, стеллажами для сборочных единиц и деталей, необходимых по ходу сборки.

В случае сборки с непрерывным перемещением собираемого объекта каждый рабочий проводит сборку, перемещаясь со скоростью движения конвейера на длину сборочной позиции, и затем возвращается в исходное положение. В связи с этим скорость движения конвейера, лимитируемая физиологическими возможностями человека,

$$v = \frac{L + l_1}{T\gamma_3},$$

где L – длина собираемого объекта в направлении движения конвейера; l_1 – промежуток между собираемыми объектами, необходимый для удобства сборки; γ_3 – число параллельных потоков, необходимых для параллельной сборки объектов в зависимости от заданного объема выпуска. При снижении скорости конвейера увеличивается число параллельных потоков

$$\gamma_3 = \frac{T_{\text{оп.нб}} + t_{n1}}{T},$$

где t_{n1} – расчетное время, необходимое рабочему для возвращения в исходное положение после выполнения операции.

Число рабочих мест или позиций при сборке:
с непрерывным движением собираемого объекта

$$q_3 = (T_0 - T_c) / [(T - t_{n1}) \gamma_3];$$

с периодическим движением собираемого объекта

$$q_4 = (T_0 - T_c) / [(T - t_{n1}) \gamma_2].$$

Длина рабочей части конвейера

$$L_{\text{раб}} = (L + l_1)(q_3 + 1).$$

Поточную сборку с перемещением собираемых объектов отличает от сборки других видов более высокая производительность, наименьший цикл, равномерный ритм выпуска продукции и более высокие технико-экономические показатели. К недостаткам следует отнести значительные первоначальные затраты на изготовление и установку сборочного оборудования. Поточную подвижную сборку экономично использовать в крупносерийном и массовом производстве изделий.

Из всего приведенного разнообразия форм организации производственного процесса сборки при разработке технологического процесса сборки надо выбирать наиболее эффективную для конкретных условий производства. Решающим фактором является количество изделий, подлежащих изготовлению с учетом нижеследующих рекомендаций.

При больших количествах подлежащих изготовлению изделий или их сборочных единиц следует выяснить экономичность использования поточного вида сборки. Если конструкция изделия обладает достаточной жесткостью базирующей детали и отличается сравнительно небольшой массой, целесообразно выбрать подвижную сборку с непрерывным перемещением собираемого изделия; в противном случае следует остановиться на подвижной сборке с прерывистым перемещением собираемого изделия.

Изделия большой массой при относительно небольших количествах экономично собирать с использованием поточного вида сборки и с периодически перемещающимися бригадами рабочих от одного собираемого объекта к другому.

С уменьшением количества изделий, подлежащих изготовлению, когда использование поточного вида сборки становится неэкономичным, следует применить непоточный вид сборки с перемещающимися объектами. При единичном изготовлении машин или малых их количествах приходится использовать непоточный вид стационарной сборки.

2.2.4. ВЫБОР МЕТОДОВ ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЯ И ЕГО КОНТРОЛЯ

Приступая к выбору методов достижения требуемой точности изделия, прежде всего необходимо сформулировать задачи, которые требуется решить в процессе достижения его точности. Эти задачи вытекают из требований к точности изделия, и каждая из них касается обеспечения точности одного из параметров размерных связей. При проведении конструктором расчетов на точность уже были избраны методы ее достижения по каждому из параметров. Технологию необходимо установить эти методы, оценить, удачен ли их выбор при заданном масштабе выпуска, организационной форме процесса, проверить правильность простановки размеров и допусков в чертежах изделия и наличие компенсаторов, если достижение требуемой точности каких-то параметров предполагается вести методом регулирования или пригонки.

Для успешного выполнения этой работы необходимо изучить конструкторские размерные цепи. При построении размерных цепей необходимо иметь в виду:

- от четкости формулировки задачи во многом зависит правильность выявленной размерной цепи и ее соответствие поставленной задаче;

- поставленную задачу можно решать только единственно правильно построенной размерной цепью, тогда размерные связи в изделии между деталями и узлами объективны;

- каждая размерная цепь дает решение только одной задачи.

При решении прямой задачи первым должно быть выявлено исходное звено, отражающее сущность решаемой задачи.

Требуемая точность изделия в процессе его сборки достигается через технологические размерные цепи. Совпадение технологической размерной цепи с конструкторской возможно лишь при достижении точности ее замыкающего звена одним из методов взаимозаменяемости. Применение других методов, использование в процессе сборки различных приспособлений и контрольных устройств, точность которых сказывается на результатах сборки, приводят к возникновению в процессе сборки размерных связей, отличающихся от тех, что действуют в работающем изделии. Технолог, разрабатывающий технологический процесс сборки изделия, должен не только отчетливо представлять размерные связи, возникающие при избранном им построении технологического процесса, но и сознательно направлять технологические размерные связи, добиваясь большей точности и экономичности процесса сборки.

Избрание метода и средств достижения точности замыкающего звена в ряде случаев требуют изменения системы простановки размеров в рабочих чертежах деталей и назначения допусков с учетом размерных связей, возникающих в избранном варианте построения технологического процесса сборки изделия при намеченной оснастке.

Вернемся к примеру с шестеренным насосом. Чтобы провести размерный анализ конструкции насоса, примем перечисленные выше зазоры (см. п. 2.2.2) в качестве замыкающих звеньев размерных цепей. Тогда задача размерного анализа сведется к установлению заложенных в конструкции насоса методов достижения точности этих замыкающих звеньев, правильности проставленных размеров и допусков на чертежах деталей насосов. Далее оценивается эффективность заложенных конструктором методов достижения точности замыкающих звеньев.

Чтобы оценить эффективность методов достижения точности замыкающих звеньев, необходимо знать не только конструкцию насоса, но и объем выпуска изделия. В связи с этим зададимся выпуском насоса в количестве 100 000 штук в год при общем выпуске по неизменным чертежам – 300 000 штук.

На рис. 2.2.2 приведен чертеж шестеренного насоса с размерными цепями, где замыкающими звеньями являются зазоры: A_{Δ} – зазор между зубчатым колесом и корпусом; B_{Δ} – зазор между корпусом и торцами зубчатых колес; B_{Δ} – боковой зазор между зубьями зубчатых колес; Γ_{Δ} – зазор между торцом оси ведомого зубчатого колеса и крышкой корпуса; D_{Δ} – зазор между корпусом и торцом зубчатого колеса.

Определим метод достижения точности замыкающего звена на примере размерной цепи радиального зазора A_{Δ} :

$$A_{\Delta} = -A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5.$$

Числовое значение звеньев размерной цепи "А" согласно чертежам деталей приведены в табл. 2.2.1.

$$\text{Тогда } A_{\Delta} = -48,75 + 0 + 0 + 0 + 48,75 = 0.$$

Если принять в качестве метода достижения A_{Δ} метод полной взаимозаменяемости, то

$$T_{A_{\Delta}} = 0,017 + 0,03 + 0,072 + 0,05 + 0,05 = 0,219 \text{ мм},$$

а координата середины поля допуска

$$\Delta'_{0A_{\Delta}} = -\Delta'_{0A_1} + \Delta'_{0A_2} + \Delta'_{0A_3} + \Delta'_{0A_4} + \Delta'_{0A_5};$$

$$\Delta'_{0A_{\Delta}} = 0,008 + 0 + 0 + 0 + 0,1 = 0,108 \text{ мм}.$$

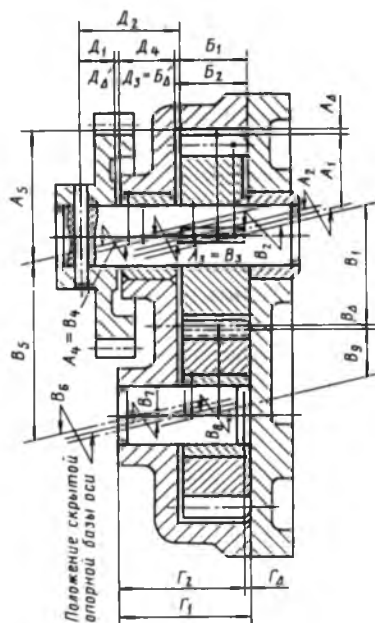


Рис. 2.2.2. Размерные цепи шестеренного насоса

Таблица 2.2.1

Звено	Номинал A_i , мм	Допуск δ'_{A_i} , мм	Координата середины поля допуска Δ'_{0A_i} , мм	Сущность допустимого отклонения
A_1	48,75	0,017	-0,008	Предельно допустимое значение биения поверхности выступов зубьев относительно отверстия
A_2	0	0,03	0	Верхнее предельное значение зазора в подшипнике
A_3	0	0,072	0	Предельное допустимое значение биения наружной поверхности втулки относительно ее отверстия
A_4	0	0,05	0	
A_5	48,75	0,05	0,1	

Верхнее и нижнее предельные отклонения замыкающего звена:

$$\Delta_{A_{\Delta}}^{\text{нб}} = 0,108 + \frac{0,219}{2} = 0,2175 \text{ мм};$$

$$\Delta_{A_{\Delta}}^{\text{нб}} = 0,108 - \frac{0,219}{2} = 0,002 \text{ мм}.$$

Техническими условиями на насос зазор задан в пределах 0,07...0,15 мм. Таким образом, при допусках на размеры деталей, заданных чертежами, рассчитывать на достижение требуемого радиального зазора методом полной взаимозаменяемости не приходится.

Из оставшихся четырех методов методы регулировки и пригонки не предусмотрены конструкцией насоса. Метод групповой взаимозаменяемости применять нецелесообразно из-за большого числа звеньев. Остается метод неполной взаимозаменяемости.

Проверим возможность достижения радиального зазора в требуемых пределах по методу неполной взаимозаменяемости, считая экономически эффективным риск 0,27 % (коэффициент риска $t = 3$) при условии, что рассеяние погрешностей составляющих звеньев подчинено закону Гаусса $\lambda'_{A_1} = 1/9$.

При этом целесообразно несколько уменьшить зазор в подшипниках, который обычно назначается для насосов среднего давления в пределах 0,002...0,003 от диаметра вала. Для вала диаметром 15 мм можно считать допустимым зазор в подшипниках 0,03...0,045 мм. Изменив в соответствии с этим значение T'_{A_3} , при достижении точности радиального зазора по методу неполной взаимозаменяемости, можно ожидать погрешности A_{Δ} в пределах

$$T'_{A_{\Delta}} = t \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \lambda_{A_i} T_{A_i}^2} = 3 \sqrt{\frac{1}{9} (0,017^2 + 0,03^2 + 0,045^2 + 0,05^2)} = 0,09 \text{ мм}.$$

Тогда

$$\Delta_{A_{\Delta}}^{\text{нб}'} = 0,108 + \frac{0,09}{2} = 0,153 \text{ мм};$$

$$\Delta_{A_{\Delta}}^{\text{нм}'} = 0,108 - \frac{0,09}{2} = 0,063 \text{ мм}.$$

Итак, при условии, что допуск на зазор в подшипниках изменен, радиальный зазор в насосе можно обеспечить по методу неполной взаимозаменяемости при риске в 0,27 %. При заданном масштабе выпуска такой риск вполне приемлем, а допуски экономически достижимы. Поэтому, принятый метод достижения точности можно признать эффективным.

Аналогичным образом устанавливаются методы достижения точности остальных замыкающих звеньев. Если потребуется, вносятся соответствующие изменения в чертежи деталей.

Размерный анализ помогает оценить конструкцию насоса с точки зрения сборки – насколько она технологична. Например, наличие общих звеньев в размерных цепях показывает необходимость предусмотреть при сборке соответствующие меры по достижению точности замыкающих звеньев.

Выбор методов и средств контроля качества изделия. Методы контроля качества изделия оказывают существенное влияние на технологический процесс его сборки.

В зависимости от уровня точности контролируемого параметра, трудоемкости контроля, величины такта выпуска контроль качества изделия его сборочных единиц и соединений может в ряде случаев выноситься в самостоятельную операцию.

Контроль качества изделия в процессе его сборки включает не только методы контроля, базирующиеся на использовании средств измерения, но и визуальные. Несмотря на несовершенство и субъективность оценки качества сборки изделий и их узлов на основе визуального контроля, этот вид контроля необходим на протяжении всего процесса сборки изделий, поэтому играет чрезвычайно важную роль. Выявление царапин, забоин, коррозии, окалины и загрязненности поверхностей смонтированных деталей, контроль наличия прокладок, шайб, проверка "качки" деталей, легкости хода, шума зубчатых колес должны выполнять не только контролеры на контрольных постах, но и сами сборщики при выполнении сборочных операций.

Контроль точности собранного изделия и его сборочных единиц имеет целью проверить соответствие точности формы, относительного положения и перемещения их исполнительных поверхностей установленным нормам. Эффективность любого контроля тем выше, чем ближе удастся получить результаты измерений контролируемых параметров к их действительным значениям.

Степень приближения измеренного к действительному зависит от следующих факторов: 1) раскрытия смысла контролируемого параметра

и явлений, порождающих возникновение погрешностей; 2) правильности раскрытия взаимосвязи различных параметров и умения выделить контролируемый параметр; 3) правильности выбора или разработки средств контроля; 4) техники осуществления контроля.

Правильная и четкая терминология раскрывает смысл контролируемого параметра. Однако для успешного контроля еще недостаточно представлять смысл контролируемого параметра. Необходимо видеть и учитывать взаимосвязь контролируемого параметра с другими параметрами точности изделия.

Например, согласно определению радиального биения его причиной служит несовпадение оси контролируемой поверхности с осью вращения самой детали. Но это несовпадение складывается из относительного смещения и поворота осей $1 - 1$ и $2 - 2$ в пространстве (рис. 2.2.3). Поэтому судить о радиальном биении какой-либо поверхности детали можно не вообще, а лишь применительно к сечению, в котором осуществляется контроль. Кроме того, на величину радиального биения при его контроле влияет погрешность формы профиля контролируемого сечения.

Чтобы получить при контроле наиболее полное представление о значении контролируемого параметра, необходимо исключить, насколько это возможно, влияние погрешностей параметров, взаимосвязанных с ним. Например, соосность переднего и заднего центров токарного станка обычно проверяют при помощи оправки, закрепляемой в центрах. Перемещая вдоль по оправке расположенные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и установленные на суппорте индикаторы, судят о величине и направлении несоосности центров (рис. 2.2.4, а). Но аналогичные показания могут дать индикаторы при повороте оси оправки относительно направляющих станины при абсолютной соосности центров (рис. 2.2.4, б). Поэтому, прежде чем приступать к проверке совпадения

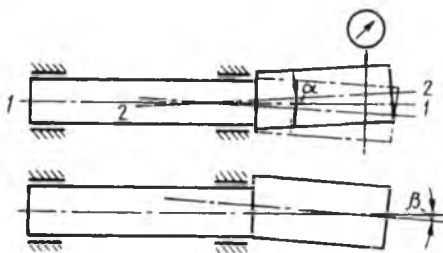


Рис. 2.2.3. Несоосность шеек вала в двух координатных плоскостях

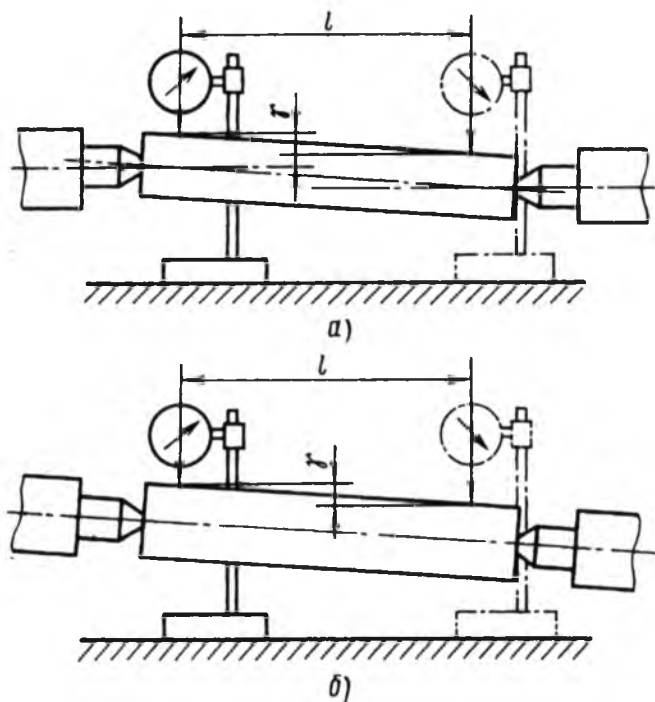


**Рис. 2.2.4. Контроль соосности центров
токарного станка с помощью оправки**

осей центров в передней и задней бабках токарного станка, необходимо обеспечить параллельность осей отверстий под центры в шпинделе и пиноли в более жестких пределах в сравнении с допустимой несоосностью центров. Рассмотрим другие широко встречающиеся примеры контроля точности изделий.

Радиальное биение вращающейся детали определяют как разность показаний индикатора при повороте детали на 180° (рис. 2.2.5, а).

Осевое биение детали определяют как разность крайних показаний индикатора, расположенного по оси вращения детали (рис. 2.2.5, б). Если деталь полая, то осевое отверстие при контроле заглушается.

Торцовое биение вращающейся детали определяют со схеме, приведенной на рис. 2.2.5, а. Индикатор, установленный по горцу детали, на

заданном радиусе показывает сумму осевого перемещения, неплоскостности торца и его неперпендикулярности оси вращения детали за полный ее оборот.

Соосность цилиндрических поверхностей двух неподвижных деталей проверяют индикатором, установленным на одной из них (рис. 2.2.5, б) при помощи муфты; вращая муфту, обкатывают индикатором вторую деталь. О несоосности судят по крайним показаниям индикатора при нахождении его в двух противоположных положениях в одной из плоскостей измерения. Так как в общем случае оси контролируемых поверхностей деталей скрещиваются в пространстве, то полученный результат измерения следует считать действительным только для контролируемого сечения. На точность определения несоосности влияют погрешности формы поверхностей второй детали, а также точность базирования муфты на первой детали.

Совпадение оси вращения одной детали с осью цилиндрической поверхности другой детали может быть проверено при помощи индикатора, установленного на вращающейся детали (рис. 2.2.5, д). Вращая первую деталь, производят обкатку индикатором неподвижной детали. О несоосности судят по наибольшей разности показаний индикатора при его нахождении в противоположных положениях в одной из плоскостей измерения. Такое измерение действительно только для контролируемого сечения; при этом овальность и огранка неподвижной детали сказываются на результатах измерения.

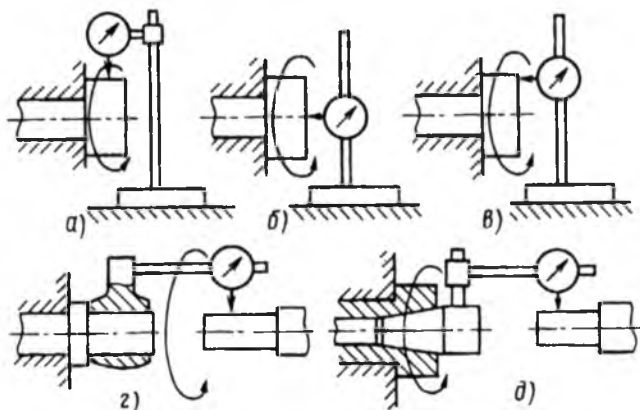


Рис. 2.2.5. Контроль точности различных параметров сборочной единицы

2.2.5. РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ МС

В основе технологического процесса сборки любого изделия лежат прежде всего процессы соединения его деталей, сборочных единиц, образующих соответствующие МС. Эти процессы являются неотъемлемой частью сборочного технологического процесса и составляют его основу. Именно эта часть сборочного процесса в первую очередь определяет эффективность всего технологического процесса и предъявляет требования к средствам механизации и автоматизации.

Модуль технологического процесса соединения (МТС) деталей представляет собой перечень технологических и вспомогательных переходов в заданной последовательности, обеспечивающих соединение деталей по данному МС и требуемым качеством и производительностью процесса. Таким образом, МТС является важной частью сборочного процесса, обеспечивающей качество собираемого изделия и во многих случаях они определяют значительную долю трудоемкости всего сборочного процесса.

Анализ литературы, посвященной сборочным процессам, показывает, что в их изучении основное внимание уделялось исследованию непосредственно процесса соединения деталей, кинематики движения соединяемых деталей, действующих сил. Практически не изученным остался вопрос разнообразия комплектов баз, которыми сопрягаются соединяемые детали, и отсутствие их типизации и унификации, а именно здесь кроются резервы существенного повышения эффективности сборочного производства. Действительно, соединение деталей – это процесс совмещения двух МПБ – комплекта основных баз присоединяемой детали с комплектом вспомогательных баз базовой детали, в результате чего возникает МС.

Анализ многочисленных соединений деталей разных изделий (сборочных единиц) подтвердил, что комплекту основных баз присоединяемой детали всегда соответствует вполне определенный и единственный ответный ему комплект вспомогательных баз у базовой детали. Все разнообразие МС ограничивается семью наименованиями МС (см. гл. 1.4):

$$\begin{aligned} \text{МС1} - \frac{Б11}{Б12}; \text{МС2} - \frac{Б211}{Б212}; \text{МС3} - \frac{Б221}{Б222}; \text{МС4} - \frac{Б311}{Б312}; \\ \text{МС5} - \frac{Б321}{Б322}; \text{МС6} - \frac{Б41}{Б42}; \text{МС7} - \frac{Б51}{Б52}. \end{aligned}$$

Таким образом, при сборке любого изделия соединение его деталей, сборочных единиц будет происходить через осуществление МС в пределах семи наименований.

Отсюда следует, что если для семи наименований МС выбрать методы соединения деталей и на этой основе разработать МТС их осуществления, то путем типизации и унификации можно создать банк МТС. Тогда построение технологического процесса сборки изделия можно рассматривать, в основном, как его компоновку из МТС, объединенных соответствующими вспомогательными переходами.

Итак, построение МТС должно начинаться с выбора метода непосредственно соединения деталей (совмещения соответствующих МПБ).

На выбор метода соединения оказывает влияние конструкция МС, его характеристики, включающие размерные параметры, качество соединения, посадка, материал соединяемых деталей, масса деталей и в первую очередь, масса присоединяемой детали. В связи с последним важное значение приобретает, какая из соединяемых деталей является в процессе сборки базой, т.е. деталью, к которой присоединяется другая деталь.

Например, для МТС при сборке МС2 имеет большое значение: винт ввинчивается в корпус или корпус навинчивается на винт.

Чтобы учесть это обстоятельство, при разработке МТС необходимо ввести различие в обозначении МС. В этой связи предлагается следующее. Как отмечалось выше, МС в записи представляет собой отношение двух базирующих модулей поверхностей. Отсюда предлагается в знаменателе этого отношения указывать базирующий модуль поверхностей, выступающий в роли комплекта вспомогательных баз детали, являющейся базовой, а в числителе – базирующий модуль поверхностей, выступающий в роли комплекта основных баз присоединяемой детали. Например, если у МС2 корпус навинчивается на винт, то МС будет представлен дробью

$$\frac{Б211}{Б212} - МС2;$$

если же винт ввинчивается в корпус, то МС будет записан как

$$\frac{Б212}{Б211} - МС2,$$

т.е. в этом случае резьбовое отверстие с торцом будет выступать в роли комплекта вспомогательных баз.

На выбор метода соединения из перечисленных выше факторов наибольшее влияние оказывает наличие в соединении зазора или натяга.

В соединениях с зазором процесс соединения осуществляется посредством свободного присоединения детали с усилиями, связанными в основном только с преодолением веса присоединяемой детали.

Соединение с зазором отличается определенной спецификой. Контакт деталей в этом соединении осуществляется с помощью пары МПБ, являющихся в изделии рабочими модулями поверхностей в случае наличия их относительного движения. Конструктивное оформление последних совпадает с соответствующими МПБ и зависит от числа степеней свободы, заложенного в соединении, и заданной траектории движения. Например, в соединении "ласточкин хвост" ползун имеет одну степень свободы (возможность поступательного движения), а в шарнирном соединении деталь имеет три степени свободы (возможность трех вращательных движений).

Специфика сборки соединения с зазором заключается в том, что соединение представляет собой совмещение двух МПБ, когда изделие не работает, т.е. подвижное соединение превращается в неподвижное. Когда же изделие начинает работать, то при наличии относительного движения МПБ деталей, образовавших соединение (МС), переходят в категорию МПР. Наличие движения одного модуля относительно другого обеспечивается отсутствием соответствующих поверхностей у МПР и в задачу оставшихся входит лишение деталей соответствующих степеней свободы. К примеру, в соединении "ласточкин хвост", чтобы ползун мог двигаться только поступательно, две поверхности МПР должны выполнять роль, аналогичную тем, которые выполняют соответственно установочная и направляющая базы. С их помощью ползун лишается пяти степеней свободы: трех вращательных и двух поступательных движений.

Поэтому, когда подвижное соединение переходит в категорию неподвижного соединения, МС оказывается образованным парой МПБ, представляющих собой неполные комплекты баз. При этом у МС одного наименования состав поверхностей в МПБ может быть разным в зависимости от того, скольких степеней свободы лишаются детали в этом соединении. На рис. 2.2.6 в качестве примера приведены три варианта МС4: лишение зубчатого колеса установленного на валу всех степеней свободы (рис. 2.2.6, а), лишение зубчатого колеса пяти степеней свободы (рис. 2.2.6, б), когда зубчатому колесу оставляется возможность вращения на валу, и лишение зубчатого колеса только четырех степеней свободы (рис. 2.2.6, в), чтобы оно могло вращаться на валу и перемещаться вдоль его оси.

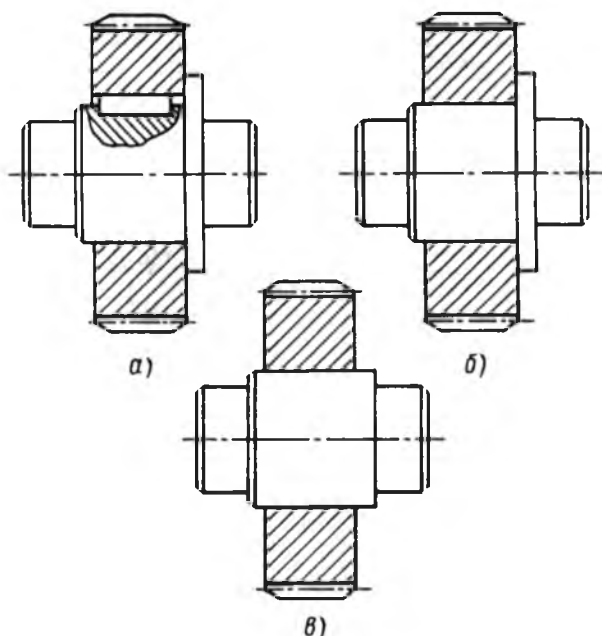


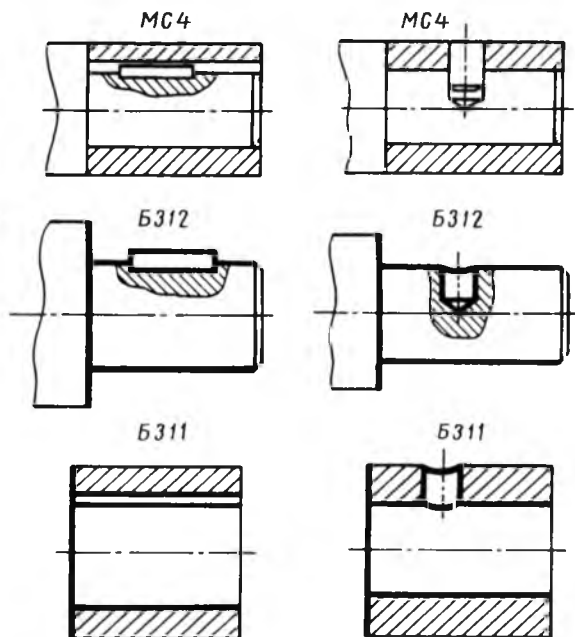
Рис. 2.2.6. Варианты базирования зубчатого колеса при лишении:

а – шести степеней свободы; *б* – пяти степеней свободы,
в – четырех степеней свободы

Процессы соединения с натягом можно разделить на две группы: соединение способом пластического деформирования и соединения тепловым способом.

В первом случае процесс соединения и фиксация достигнутого положения осуществляются практически одновременно, во втором случае – последовательно. Сначала одну из соединяемых деталей нагревают или охлаждают, затем осуществляют их соединение. Далее по мере охлаждения нагретой детали или нагрева охлажденной детали в соединении возникает натяг и тем самым осуществляется фиксация достигнутого относительного положения.

Итак, на содержание МТС определяющее влияние оказывает конструкция МС, его размерные и качественные характеристики, материал, размеры и конструкция соединяемых деталей. Эти факторы можно разделить на две группы: факторы, определяемые непосредственно МС



2.2.7. Разновидности конструктивного оформления МС4

(конструкция, размеры, качественные показатели), и факторы, определяемые соединяемыми деталями (материал, размеры, конструкция).

В свою очередь МС одного наименования могут существенно различаться видом посадки, конструкцией, размерами и качественными характеристиками. В качестве примера на рис. 2.2.7 приведены два вида одного и того же МС4, образованные модулями поверхностей Б311 и Б312.

В связи с этим под МС каждого наименования необходимо разработать группу МТС, которые учитывали бы не только разнообразие характеристик МС, но и полноту совмещаемых МПБ и масштаб выпуска МС.

МТС состоит из трех основных этапов:

предварительное базирование присоединяемой детали, в результате которого соединяемые детали должны занять требуемое относительное положение;

непосредственно процесс соединения;

фиксация достигнутого положения.

С учетом этих этапов формируют технологические и вспомогательные переходы МТС.

2.2.6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА И ОПЕРАЦИЙ СБОРКИ ИЗДЕЛИЯ

Разработка технологического маршрута сборки изделия начинается с установления последовательности сборочного процесса. В соответствии с делением изделия на сборочные единицы различают общую сборку изделия и сборку его сборочных единиц.

Разработку последовательности сборки осуществляют на основе анализа изделия, представленного совокупностью сборочных единиц и деталей в виде графа сборочных единиц и деталей и графа деталей изделия.

Деление изделия на сборочные единицы не является однозначным и зависит от масштаба выпуска и требований процесса сборки может изменяться как по составу сборочных единиц, так и по их содержанию.

На последовательность выполнения сборки оказывают влияние:

- конструкция, масса и размеры собираемого изделия и его составных частей; тип производства и программа выпуска изделий;
- функциональная взаимосвязь элементов изделия и степень их взаимозаменяемости;
- точность сборки и методы ее достижения;
- степень расчлененности изделия на отдельные узлы;
- условия монтажа силовых и кинематических передач;
- число маложестких и легко повреждаемых элементов и др.

При сборке невзаимозаменяемых деталей и изделий на последовательность сборки значительное влияние оказывают необходимость выполнения пригоночных работ, промежуточной разборки и сборки, необходимость дополнительной обработки, контроль и т.п.

Разработку последовательности сборки выполняют, используя результаты проведенного размерного анализа конструкции собираемого изделия, выбора сборочных технологических баз и установление рациональных методов сборки с учетом такта выпуска, типа производства и организационной формы сборки.

Общая сборка машины должна начинаться с установки базовой детали или сборочной единицы изделия, которой обычно являются рамы, станины, основания и т.п. Базовую деталь при этом можно установить в любом удобном для сборки положении, если ее упругие деформации в процессе сборки настолько малы, что их влиянием на точность изделия можно пренебречь. В противном случае жесткость базовой детали увеличивают путем ее установки на жесткий сборочный стенд, обеспечив в пределах требуемой точности относительное положение ее вспомога-

тельных баз. При подвижной сборке базовую деталь или перемещают вместе со сборочными приспособлениями, увеличивающими ее жесткость (например, используя спутник в виде плиты и т.п.), или производят выверку требуемой точности относительно положения ее вспомогательных баз на тех сборочных позициях, где это требуется по ходу процесса.

После установки базовой детали *разрабатывают последовательность установки на базовую деталь всех сборочных единиц и деталей*. Для этого пользуются схемами размерных цепей, построенных на основе размерного анализа и выявленных методов достижения требуемой точности замыкающего звена в каждой из размерных цепей; при этом следует руководствоваться следующими положениями:

1) сборку начинают со сборочных единиц или деталей, размеры которых являются общими звеньями, принадлежащими большему числу параллельно-связанных размерных цепей, и продолжают по нисходящей по числу размерных цепей;

2) в каждой размерной цепи сборку начинают с тех сборочных единиц, размеры которых являются звеньями ветви основной размерной цепи;

3) при прочих равных условиях сборку начинают с той размерной цепи, точность замыкающего звена которой выше;

4) намеченную последовательность сборки целесообразно проверять путем пробной сборки-разборки изделия.

При выполнении сборки должна соблюдаться такая последовательность установки, при которой смонтированные в первую очередь детали и сборочные единицы не должны мешать установке последующих деталей и сборочных единиц.

Разрабатывая последовательность сборки изделия, очень удобно изображать ее графически в виде схемы сборки. Последняя не только помогает в разработке последовательности сборки изделия, но и является основным оперативным документом, по которому персонал сборочного цеха знакомится с последовательностью сборки нового изделия, организует выполнение сборочного процесса, производит комплектование изделия, подачу сборочных единиц и деталей в надлежащей последовательности к местам сборки, ведет учет, расставляет рабочих, планирует производство и разрешает вносить усовершенствования в конструкцию, технологический процесс и организацию производства изделия.

Конструкции многих изделий не позволяют вести их сборку без предварительной частичной разборки сборочных единиц, поступающих на общую сборку в собранном виде. Например, при сборке автомобильных двигателей, встречается операция, например, снятия у блока цилин-

дров крышек опор под коленчатый вал перед его монтажом. При сборке многих станков перед монтажом шпинделя в коробку скоростей с него предварительно снимается ряд деталей – зубчатые колеса, кольца подшипников и т.д. Поэтому при построении схемы сборки в нее необходимо включать и все неизбежные по ходу технологического процесса разборки сборочных единиц. Для изделий, которые посылаются потребителю в разобранном виде, строятся специальные схемы их демонтажа у изготовителя и повторной сборки у потребителя, так как в таких случаях сборочные единицы обычно значительно укрупняются.

Схема сборки и разборки изделия должна быть наглядна и показывать последовательность процесса, поэтому схему общей сборки изделия удобнее всего строить, вводя зоны деталей и сборочных единиц (последние, если необходимо, разбивают по зонам сборочных единиц первого порядка, второго и т.д.) и зону изделия в целом. Каждому из составляющих изделие элементов дается условное обозначение (например, деталь обозначается небольшим прямоугольником, в котором указываются наименование и номер детали по чертежу). Прямоугольниками больших размеров или другими геометрическими фигурами обозначаются и все остальные элементы. На схему общей сборки изделия наносятся только условные обозначения деталей и сборочных единиц, непосредственно поступающих на общую сборку.

При построении схемы сборки в отличие от традиционной схемы сборки кроме указанных обозначений следует указывать и МС, с помощью которых осуществляется соединение деталей.

На рис. 2.2.8 в качестве примера приведена часть редуктора и схема ее сборки, из которой видно, в какой последовательности детали устанавливаются в корпус 1 редуктора, с помощью каких МС происходит соединение деталей и какие сборочные единицы образуются в процессе сборки. С помощью такой схемы сборки можно видеть не только наименования МС, но и последовательность их осуществления.

На рис. 2.2.9 приведена гистограмма МС, имеющих место в процессе сборки редуктора. Из нее следует, что из семи возможных наименований МС в сборке приведенной части редуктора участвуют только четыре наименования: МС1, МС2, МС4 и МС5; их общее количество составляет 14 штук, а доминирует среди них МС4.

Таким образом, какими бы не были разными сборочные технологические процессы изделий, сущность каждого из них заключается в осуществлении той или иной последовательности соответствующих МС в пределах семи наименований.

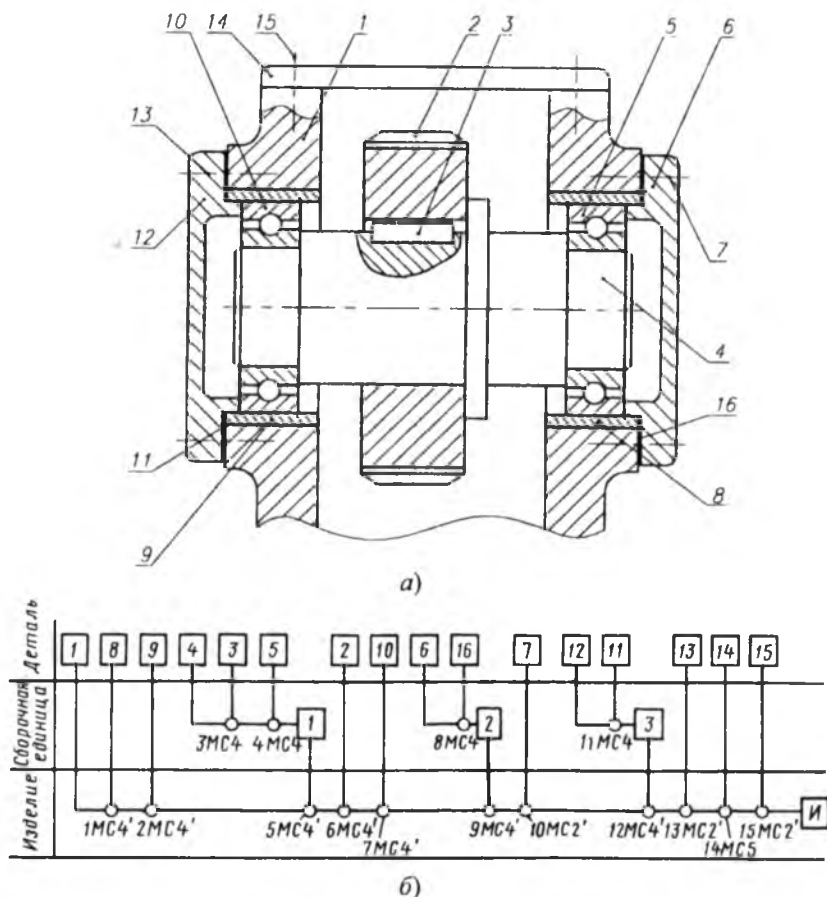


Рис. 2.2.8. Сборка части редуктора:

а – чертеж части редуктора; б – схема сборки

Последовательность сборки изделия может быть разработана в нескольких вариантах. Выбор наиболее рационального варианта последовательности сборки осуществляется на основе проведения расчетов экономической эффективности. Наиболее целесообразным будет тот вариант, который обеспечивает минимальную технологическую себестоимость сборки изделия, сокращения цикла сборки изделия и уменьшение объема незавершенного производства.

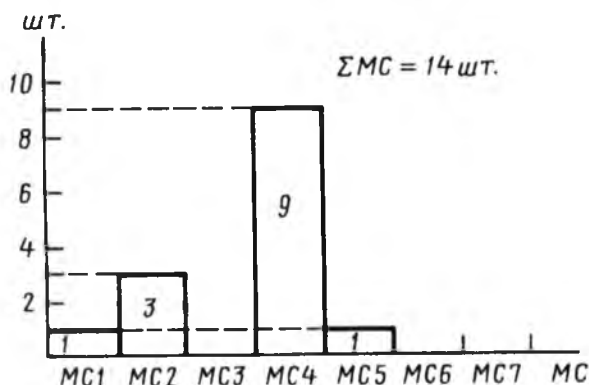


Рис. 2.2.9. Гистограмма МС редуктора

На основе полученной схемы сборки изделия формируется технологический маршрут, который представляет собой последовательность сборочных операций, а также расположение контрольных и вспомогательных операций. В свою очередь сборочная операция состоит из одного или нескольких МТС.

Перед построением технологического маршрута выбираются или разрабатываются МТС под осуществление каждого МС. В соответствии с этим технологический маршрут строится на основе разработанной схемы сборки изделия и МТС и включает последовательность и содержание технологических и вспомогательных операций сборки. В свою очередь содержание технологической операции составляют МТС и связывающие их вспомогательные переходы.

С целью выбора наиболее эффективного варианта технологического маршрута производится нормирование всех МТС для определения трудоемкости сборочных работ и построения циклограммы сборки. Циклограмма сборки служит: 1) для установления возможно более короткого цикла сборки путем совмещения во времени выполнения отдельных переходов; 2) для соединения переходов технологического процесса сборки с целью формирования операций, выполняемых на каждой из рабочих позиций (или мест) в промежутки времени, по возможности равные или кратные установленному такту; 3) для внесения необходимых для этого изменений в конструкцию изделия (повышающих ее технологичность), в технологический процесс сборки или технологическую оснастку.

Полученная циклограмма используется для выявления резервов сокращения цикла сборки посредством: 1) совмещения выполнения МТС или целых операций во времени; 2) сокращения трудоемкости выполнения отдельных переходов.

Содержание операций устанавливают в зависимости от выбранного типа производства и такта сборки. При массовом производстве содержание операции должно быть таким, чтобы ее длительность была равна такту (несколько меньше такта) или кратна ему. Выполняемая работа должна быть по своему характеру однородной и отличаться определенной законченностью. Длительность операции определяют укрупненно по нормативам с последующим уточнением и корректировкой.

Продолжительность всех несовмещенных операций необходимо проектировать равной или кратной установленному такту, т.е. добиться "синхронизации" операций. Этого можно достигнуть путем перераспределения МТС и промежуточных вспомогательных переходов технологического процесса между операциями, сокращениями трудоемкости МТС за счет механизации труда, внедрения новых видов технологической оснастки, увеличения точности механической обработки сборочных единиц и деталей, поступающих на сборку, изменения конструкции изделия для перехода на достижение требуемой точности методами взаимозаменяемости или регулировки, дополнительного деления изделия на сборочные единицы, повышения квалификации работающих, лучшей организацией рабочих мест.

Одновременно с разработкой технологического процесса общей сборки изделия должен производиться критический анализ его конструкции с учетом использования всех возможностей и особенностей намечаемого технологического процесса и внесения необходимых изменений для повышения технологичности изделия.

На эффективности сборочного процесса благоприятно сказывается совпадение сборочных единиц изделия с его агрегатами и механизмами.

Конструкция изделия, построенная с учетом этого совмещения, позволяет:

- 1) осуществлять независимую и параллельную сборку, регулировку и испытание каждой сборочной единицы;
- 2) подавать на общую сборку изделия сборочные единицы, отвечающие их служебному назначению;
- 3) сокращать вышеизложенными путями цикл и трудоемкость общей сборки, увеличивать выпуск с единицы сборочной площади и улучшать другие технико-экономические показатели;

4) быстрее вносить усовершенствования и изменения в конструкцию сборочных единиц для повышения качества изделия;

5) использовать кооперацию и специализацию заводов для изготовления сборочных единиц.

Опыт показывает, что с увеличением объема выпуска изделия делят на большое число сборочных единиц, в особенности при переходе на поточное производство, когда деление изделия на сборочные единицы является одним из средств синхронизации сборочных операций и широкого использования кооперации заводов, специализированных на производстве отдельных сборочных единиц.

Следующим требованием технологии поточной сборки является создание такой конструкции изделия и его сборочных единиц, при сборке которых не требуется производить хотя бы частичную их разборку. Другими словами, изделие и его сборочные единицы должны в процессе сборки подвергаться только сборочным операциям, что приобретает особую актуальность при автоматизации сборочных технологических процессов.

Для составления маршрута сборки большое значение имеют назначение, местоположение и содержание операций технического контроля и других вспомогательных операций (предварительная очистка деталей, регулирование, пригонка, балансировка и др.).

Разработка операционной технологии сборки осуществляется на основе технологического маршрута. При разработке операции определяют схему базирования и закрепления деталей и сборочных единиц собираемых изделий, уточняют содержание операции, устанавливают последовательность и возможность совмещения МТС и вспомогательных переходов во времени, окончательно выбирают оборудование, приспособления и инструменты (или дают задание на их проектирование), назначают режимы работы сборочного оборудования, корректируют нормы времени, устанавливают настроечные размеры и составляют схемы наладок. Разработка сборочной операции – задача многовариантная. Варианты оценивают по производительности и себестоимости при условии обеспечения заданного качества. Проектируя сборочную операцию, стремятся к уменьшению штучного времени, что позволяет сократить потребное количество оборудования и рабочую силу. Штучное время увязывают с темпом работы поточной линии.

По последовательности работы сборочных инструментов и расположению собираемых изделий операции могут быть последовательного, параллельного и параллельно-последовательного выполнения. При различном сочетании указанных признаков образуется ряд схем, значительно отличающихся друг от друга по производительности и себестоимости [9].

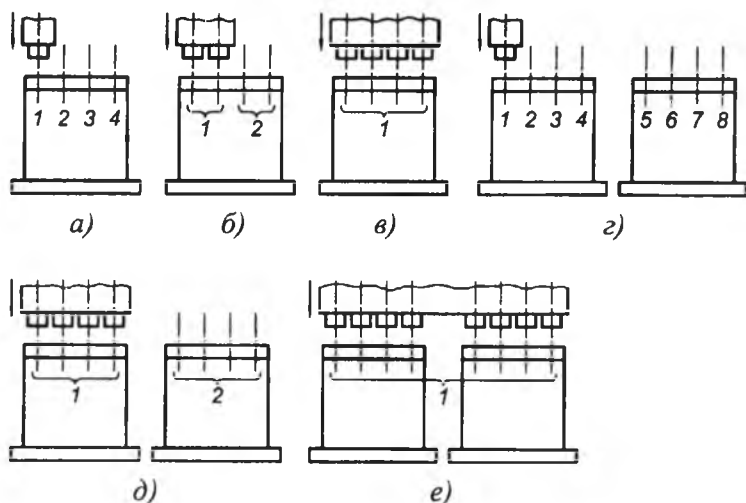


Рис. 2.2.10. Примеры схем операции сборки

На рис. 2.2.10 показаны примеры построения схем операций по затяжке резьбовых соединений изделия: одноместные (рис. 2.2.10, а – в); многоместные (рис. 2.2.10, г – е); одноинструментные (рис. 2.2.10, а, г); многоинструментные (рис. 2.2.10, в, д, е); последовательные (рис. 2.2.10, а, г); параллельно-последовательные (рис. 2.2.10, б, д) и параллельные (рис. 2.2.10, в, г). Переход от одноместной, одноинструментной, последовательной схемы (рис. 2.2.10, а) к многоместной, многоинструментной, параллельной схеме (рис. 2.2.10, е) часто повышает производительность в десятки раз; последние схемы используют в поточно-массовом производстве.

Принятая операция позволяет выбрать сборочное оборудование и механизированные инструменты из имеющегося парка или по каталогу. Метод сборки определяет тип оборудования и инструмента (пресс, клепальная машина, резьбозавертывающий автомат), а размеры изделия – основные размеры оборудования. Установленная степень концентрации и схема построения сборочной операции влияют на выбор модели оборудования. Предпочтительна модель с запасом мощности, с большим сроком работы до ремонта и большей степенью автоматизации рабочего цикла. Если принято решение выполнять сборку на специальном оборудовании, то должно быть составлено техническое задание на его проектирование с соответствующими обоснованиями и пояснениями.

При разработке сборочных операций устанавливают режим работы сборочного оборудования и механизированных инструментов (усилие запрессовки, моменты и порядок затяжки резьбовых соединений, температуру нагрева или охлаждения при использовании сборки с тепловым воздействием, моменты при выполнении вальцовочных соединений) и определяют настрочные размеры для их наладки.

2.2.7. ВЫБОР СРЕДСТВ ОБЛЕГЧЕНИЯ ТРУДА

Трудоемкость сборочного производства составляет в среднем до 40...60 % от общей трудоемкости изделия; сборочные технологические процессы отличаются значительными затратами физического труда по сравнению с изготовлением деталей и вследствие низкого уровня механизации. В связи с этим задача облегчения труда рабочих-сборщиков имеет большое значение для повышения производительности.

При выборе средств облегчения труда и повышения производительности необходимо иметь в виду количество изделий, подлежащих сборке в единицу времени и по неизменяемым чертежам.

При изготовлении изделий единицами или в небольших количествах применяют главным образом универсальную технологическую оснастку и оборудование. С увеличением масштаба выпуска изделий экономически оправдано использование специальных средств. Наконец, выпуск изделий в больших количествах позволяет осуществить комплексную механизацию и автоматизацию сборочных работ, обеспечивающую наиболее высокую производительность и избавляющую рабочих-сборщиков от тяжелого и однообразного труда. При автоматизации сборочных работ особо остро ощущается необходимость в комплексном подходе к решению этой задачи, так как автоматизация только отдельных видов работ часто не дает ожидаемого эффекта в целом.

Выбор средств облегчения труда зависит от характера сборочных работ, которые можно разделить на три группы: технологические переходы, вспомогательные переходы и другие виды работ, например, упаковка и разупаковывание, консервация и расконсервация, погрузка, разгрузка и т.п.

Простейшая механизация процесса координирования деталей и сборочных единиц сводится, главным образом, к облегчению труда и повышению его производительности.

Наибольшие трудности вызывает механизация переходов и операций, связанных с координированием сборочных единиц и деталей в про-

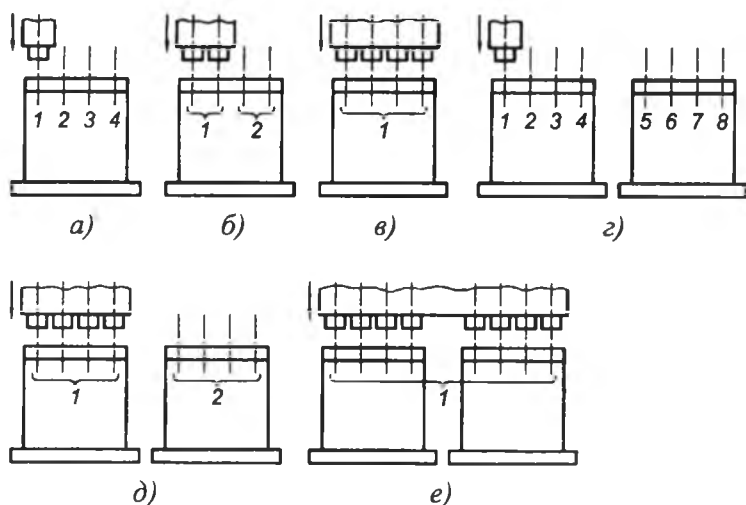


Рис. 2.2.10. Примеры схем операции сборки

На рис. 2.2.10 показаны примеры построения схем операций по затяжке резьбовых соединений изделия: одноместные (рис. 2.2.10, а – в); многоместные (рис. 2.2.10, г – е); одноинструментные (рис. 2.2.10, а, г); многоинструментные (рис. 2.2.10, в, д, е); последовательные (рис. 2.2.10, а, г); параллельно-последовательные (рис. 2.2.10, б, д) и параллельные (рис. 2.2.10, в, г). Переход от одноместной, одноинструментной, последовательной схемы (рис. 2.2.10, а) к многоместной, многоинструментной, параллельной схеме (рис. 2.2.10, е) часто повышает производительность в десятки раз; последние схемы используют в поточно-массовом производстве.

Принятая операция позволяет выбрать сборочное оборудование и механизированные инструменты из имеющегося парка или по каталогу. Метод сборки определяет тип оборудования и инструмента (пресс, клепальная машина, резьбозавертывающий автомат), а размеры изделия – основные размеры оборудования. Установленная степень концентрации и схема построения сборочной операции влияют на выбор модели оборудования. Предпочтительна модель с запасом мощности, с большим сроком работы до ремонта и большей степенью автоматизации рабочего цикла. Если принято решение выполнять сборку на специальном оборудовании, то должно быть составлено техническое задание на его проектирование с соответствующими обоснованиями и пояснениями.

При разработке сборочных операций устанавливают режим работы сборочного оборудования и механизированных инструментов (усилие запрессовки, моменты и порядок затяжки резьбовых соединений, температуру нагрева или охлаждения при использовании сборки с тепловым воздействием, моменты при выполнении вальцовочных соединений) и определяют настроечные размеры для их наладки.

2.2.7. ВЫБОР СРЕДСТВ ОБЛЕГЧЕНИЯ ТРУДА

Трудоемкость сборочного производства составляет в среднем до 40...60 % от общей трудоемкости изделия; сборочные технологические процессы отличаются значительными затратами физического труда по сравнению с изготовлением деталей и вследствие низкого уровня механизации. В связи с этим задача облегчения труда рабочих-сборщиков имеет большое значение для повышения производительности.

При выборе средств облегчения труда и повышения производительности необходимо иметь в виду количество изделий, подлежащих сборке в единицу времени и по неизменяемым чертежам.

При изготовлении изделий единицами или в небольших количествах применяя главным образом универсальную технологическую оснастку и оборудование. С увеличением масштаба выпуска изделий экономически оправдано использование специальных средств. Наконец, выпуск изделий в больших количествах позволяет осуществить комплексную механизацию и автоматизацию сборочных работ, обеспечивающую наиболее высокую производительность и избавляющую рабочих-сборщиков от тяжелого и однообразного труда. При автоматизации сборочных работ особо остро проявляется необходимость в комплексном подходе к решению этой задачи, так как автоматизация только отдельных видов работ часто не дает ожидаемого эффекта в целом.

Выбор средств облегчения труда зависит от характера сборочных работ, которые можно разделить на три группы: технологические переходы, вспомогательные переходы и другие виды работ, например, упаковка и разупаковывание, консервация и расконсервация, погрузка, разгрузка и т.п.

Простейшая механизация процесса координирования деталей и сборочных единиц сводится, главным образом, к облегчению труда и повышению его производительности.

Наибольшие трудности вызывает механизация переходов и операций, связанных с координированием сборочных единиц и деталей в про-

цессе их сборки и соединения. Эти трудности порождаются тем, что координирование и последующее соединение мелких деталей и сборочных единиц должны быть выполнены с высокой точностью; при этом, как правило, должна быть решена пространственная задача. Малейшая погрешность координирования, выходящая за пределы допусков, приводит к невозможности соединения без устранения полученных погрешностей координирования и к получению недостаточной точности соединения из-за возникновения перекосов, что приводит к необходимости разборки и повторной сборки соединения для достижения требуемой точности. При этом в случае разборных соединений приходится вносить исправления в сопрягаемые детали, а в случае неразборных – заменять одну или обе сопрягаемые детали новыми из-за порчи их поверхностей при разборке.

Для облегчения пригоночных работ, представляющих собой утомительную физическую работу, надо стремиться обеспечить минимально необходимый припуск на пригонку и разработать необходимые контрольно-измерительные приспособления для определения точности относительного положения собираемых деталей и сборочных единиц, а также приспособления для пригонки (шабровочные плиты, угольники, приспособления для установки, закрепления и поворота обрабатываемых деталей) и режущий инструмент удобной конструкции (шаберы).

Шабрение механизировано с помощью ручных и переносных шабровочных машин. Для закрепления небольших деталей применяют зажимные приспособления и магнитные плиты, а для подъема и перемещения шабровочных плит и линеек – специальные устройства.

При выполнении технологического процесса сборки возникает необходимость в систематической проверке качества собираемого изделия и его сборочных единиц. Это требуется делать не только тогда, когда требуемая точность в тех или иных размерных и кинематических цепях достигается методами регулировки и особенно пригонки, но и в тех случаях, когда для достижения требуемого их качества используются методы взаимозаменяемости, так как в процессе сборки возникает ряд дополнительных погрешностей, связанных с влиянием упругих деформаций, сменой баз и т.д.

На выбор сборочного оборудования оказывают влияние: конструкция собираемого изделия и его составных частей; геометрическая форма, размеры и масса; требования, предъявляемые к сборке изделия; такт сборки и программа выпуска собираемых изделий; размеры партий изделий и число запусков; режимы процесса сборки и другие факторы. При определении вида и конструкции сборочного оборудования проводится

обоснование и выбор его составляющих элементов: загрузочных устройств, сборочных головок, базирующих устройств и устройств относительной ориентации компонентов на позициях сборки, устройств контроля, вспомогательных и транспортных устройств, устройств управления.

При проведении анализа и обосновании выбора средств контроля учитывают: конструктивные особенности собираемого изделия (конфигурацию, возможность доступа, размеры и т.п.); виды контролируемых признаков (геометрический размер, физический параметр, относительное расположение поверхностей и т.п.); допустимые погрешности измерения; наличие измерительных баз; повреждаемость (деформируемость) при контроле; производительность контроля и т.д.

Выбор конструкции технологической оснастки осуществляется на основе анализа затрат на выполнение технологического процесса сборки с установленным тактом сборки при заданном качестве собираемых изделий. На основе проведения такого анализа выбираются наиболее экономически эффективная оснастка соответствующего уровня механизации и автоматизации, а также степень специализации и переналаживаемости.

Для перемещения собираемых объектов к месту сборки используются ручные тележки и электрокары, нередко снабженные специальной тарой, исключающей возможность повреждения сборочных объектов в процессе перемещения, а также различного рода краны, кран-балки, электротельферы, конвейеры и специальные устройства. Перемещение собираемых объектов в процессе сборки осуществляется при помощи различного типа конвейеров.

2.2.8. НОРМИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СБОРКИ И ОФОРМЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Нормирование технологического процесса сборки изделия является важным этапом, с помощью которого определяется трудоемкость сборки, количество рабочих мест. Нормирование ведется с помощью формул расчета машинного времени, если применяется сборочное оборудование, и с использованием нормативов на слесарно-сборочные работы.

Нормативы времени содержат нормы оперативного времени выполнения наиболее распространенных сборочных переходов. При наличии банка типовых МТС в нормативы должны быть внесены нормы оперативного времени на их осуществление. При подсчете штучного времени оперативное время дополняется временем обслуживания рабочего места и дополнительным временем (в %) от оперативного времени.

Установленные нормы времени на сборку отдельных сборочных единиц и машины в целом дают возможность определить трудоемкость их сборки как сумму затрат времени на выполнение отдельных переходов. Затем определяют число рабочих или бригад рабочих, необходимых для образования сборочных единиц всех уровней и общей сборки изделия.

Знание трудоемкости переходов и числа рабочих дает возможность объединить МТС и переходы в операции. Каждая операция должна представлять собой законченную часть технологического процесса, состоящую из одного или нескольких МТС и вспомогательных переходов, выполняемую рабочим или бригадой рабочих на отдельном рабочем месте.

Нормативы времени на слесарно-сборочные работы содержат нормы основных технологических и вспомогательных промежутков времени выполнения наиболее распространенных сборочных переходов. Время обслуживания рабочего места, выделяемое рабочему для раскладки инструмента перед началом работы, очистки рабочего места, замены инструмента в процессе работы, передачи рабочего места сменщику, устанавливают в зависимости от вида сборочных работ в размере 2...6 % от оперативного времени, представляющего собой сумму основного технологического и вспомогательного времени.

Перерывы для отдыха и удовлетворения естественных надобностей устанавливают в размере 4...6 % оперативного времени. При конвейерной сборке рекомендуется устанавливать перерыв на 10 мин через каждые 1 ч 40 мин работы.

При сборке изделий партиями должны быть учтены с помощью нормативов затраты времени на подготовку сборочных работ для данной партии – подготовительно-заключительное время. При определении времени, затрачиваемого на операцию (трудоемкость операции), подготовительно-заключительное время относится к одному изделию и суммируется со штучным временем.

Суммированием трудоемкостей отдельных операций определяют трудоемкость сборки всего изделия, количество необходимых рабочих мест или позиций и потоков, необходимых для сборки одинаковых изделий.

В результате разработки технологического процесса сборки изделия при поточном производстве должна быть обеспечена длительность операций, равная или кратная такту сборки машины. Упорядочение операций по времени является достаточно сложным действием и требует критической оценки всей предшествующей работы над проектом технологического процесса сборки изделия.

Равенство или кратность времени операций такту сборки могут быть достигнуты путем: частичных изменений последовательности сборки изделия; частичной перекомпоновки операций из МТС; совмещения и расчленения операций; изыскания более производительных методов сборки; использования более производительного оборудования и технологической оснастки; корректирования режимов работы оборудования.

Все мероприятия по упорядочению операций по времени не должны влиять на качество изделия, производительность и удобство его сборки.

Технологическая документация процесса сборки по назначению делится на основную и вспомогательную. К основной относятся документы, полностью и однозначно определяющие содержание технологического процесса, а также содержащие информацию для решения инженерно-технических, планово-экономических и организационных задач. К вспомогательным относятся документы, применяемые в качестве сопутствующих при разработке, внедрении и функционировании технологических процессов (например, карты заказов на проектирование приспособлений и инструментов, акты проведения испытаний и т.п.). К *технологическим документам общего назначения* относятся документы, не зависящие от применяемых технологических методов сборки (например, карта эскизов, технологическая инструкция). К *технологическим документам специального назначения* относятся документы, применяемые при описании технологических процессов и операций в зависимости от применяемых технологических методов сборки и типа производства (например, маршрутная карта, карта технологического процесса, операционная карта, комплектовочная карта, ведомость оснастки и оборудования, ведомость сборки изделия, карта типового (группового) технологического процесса, карта типовой (групповой) операции и др.).

Маршрутная карта является обязательным документом; предназначена для маршрутного или маршрутно-операционного описания технологического процесса сборки или указания полного состава технологических операций (при операционном описании), включая контроль и межоперационные перемещения по всем операциям; описания различных технологических методов в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, оснастке, материальных нормативах и трудовых затратах.

Карта технологического процесса предназначена для операционного описания технологического процесса сборки в технологической последовательности по всем операциям с указанием МТС, вспомогательных переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, режимах и трудовых затратах.

Операционная карта предназначена для описания операции с указанием последовательности выполнения МТС, вспомогательных переходов, данных о средствах технологического оснащения, режимах и трудовых затратах. Эта карта применяется при разработке единичных технологических процессов сборки, при этом карты разрабатывают по всем операциям.

Ведомость сборки изделия предназначена для указания состава деталей и сборочных единиц для сборки изделия, их применяемости, количественного состава и ступеней входимости.

Карта типовой (групповой) операции предназначена для описания типовой (групповой) технологической операции с указанием последовательности выполнения МТС, вспомогательных переходов и общих данных о средствах технологического оснащения и режимах сборки. Эта карта применяется совместно с ведомостью деталей (сборочных единиц) к типовому (групповому) технологическому процессу (операции) сборки, которая предназначена для указания состава деталей (сборочных единиц, изделий), собираемых по типовому (групповому) технологическому процессу (операции) сборки, и данных о средствах технологического оснащения, материале, режимах обработки и трудозатратах.

При построении модульного технологического процесса сборки изделия вводится карта МТС, в которой указывается перечень и последовательность переходов по сборке МС с указанием затрат времени, инструмента и приспособления.

Комплектовочная карта предназначена для указания данных о деталях, сборочных единицах и материалах, входящих в комплект собираемого изделия.

Ведомости оборудования и оснастки предназначены для указания применяемых соответственно оборудования и технологической оснастки при выполнении технологического процесса сборки.

Карта эскизов представляет графический документ, содержащий эскизы, схемы, таблицы, который предназначен для пояснения выполнения технологического процесса сборки, операции, МТС или перехода.

Технологическая инструкция предназначена для описания технологических процессов сборки, методов и приемов, повторяющихся при сборке изделий (составных частей изделий), правил эксплуатации средств технологического оснащения. Данная инструкция применяется в целях сокращения объема разрабатываемой технологической документации. В состав технологической документации также входят чертежи общих видов сборочного оборудования и его механизмов и агрегатов, технологические схемы общей и узловой сборки, рабочие чертежи собираемого изделия.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Написать формулу для определения величины такта сборки.
2. В чем разница между номинальным и действительным годовым фондом времени?
3. Что должно содержаться в формулировке служебного назначения изделия?
4. В чем состоит методика анализа соответствия технических требований и норм точности служебному назначению изделия?
5. Перечислите виды и организационные формы производственного процесса сборки изделий.
6. Методика выбора метода достижения заданной точности замыкающего звена размерной цепи изделия.
7. Что входит в состав МТС?
8. Какие факторы влияют на разнообразие МТС для сборки МС одного наименования?
9. Что составляет основу МТС?
10. Какие факторы определяют последовательность сборки изделия?
11. Что такое схема сборки изделия и для чего она нужна?
12. Что такое технологический маршрут сборки изделия?
13. Что является определяющим фактором при выборе средств облегчения труда?
14. В чем цель нормирования технологического процесса сборки?
15. Какие дополнительные требования предъявляются к нормированию операций при поточном производстве?
16. Перечислите основные технологические документы процесса сборки изделия.

Глава 2.3

ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

Разработка технологического процесса изготовления детали представляет собой решение сложной комплексной задачи, когда требуется найти для данных производственных условий переход от полуфабриката, поставляемого обычно металлургической промышленностью, к готовой детали, отвечающей всем требованиям ее служебного назначения. Выбранный вариант должен обеспечить наиболее низкую себестоимость изготовления детали при заданном ее качестве и производительности процесса.

При разработке технологического процесса необходимо учитывать влияние действующих на процесс факторов, выявлять и оценивать их удельное значение и на этой основе разрабатывать технологический процесс. *Разработка технологического процесса включает следующие этапы:*

1. Изучение рабочих чертежей детали, технические требования, нормы точности, требования технологии сборки и служебное назначение детали.
2. Выявление количества деталей, подлежащих изготовлению в единицу времени и по неизменяемому чертежу.
3. Определение вида и организационных форм будущего производственного процесса.
4. Выбор заготовки, из которой должна изготавливаться деталь.
5. Выбор технологического процесса получения заготовки, если изготовление детали непосредственно из полуфабриката неэкономично или физически невозможно.
6. Разработка непосредственно технологического процесса изготовления детали из заготовки.

Исходные данные для разработки: 1) сборочные и рабочие чертежи изделия и детали; 2) технические требования, нормы точности и другие данные, характеризующие служебное назначение детали в изделии, требования к детали, выявленные при разработке технологического процесса сборки; 3) количество деталей, подлежащих изготовлению в единицу времени по неизменяемому чертежу; 4) условия, в которых должен осуществляться технологический процесс – вновь проектируемый или действующий завод, состав оборудования, наличие и перспектива его обновления путем модернизации, получения нового, наличие производственных площадей, перспективы расширения, наличие и перспектива получения кадров; 5) состав элементной базы технологического назначения, включающей методы обработки, станочное оборудование, технологическую оснастку; 6) справочная литература, руководящие материалы, нормативы.

Как уже отмечалось в гл. 1.5, следующим шагом в развитии методологии разработки технологических процессов является модульное построение технологического процесса, что позволяет объединить преимущества единичного, типового, группового технологических процессов.

Модульный технологический процесс позволяет:

- учитывать индивидуальные особенности изготавливаемой детали – как единичный технологический процесс;
- использовать типовые технологические решения – как типовой процесс;
- применять специализацию рабочих мест – как групповой процесс, даже в условиях единичного производства;
- в случае необходимости изменять последовательность выполнения операции технологического процесса, придавая ему определенную гибкость.

Модульный технологический процесс базируется на более совершенной методике построения технологических процессов и как традиционный единичный процесс служит базой для разработки типовых и групповых технологических процессов.

2.3.1. ИЗУЧЕНИЕ СЛУЖЕБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЕТАЛИ, ЕЕ КОНСТРУКЦИИ И АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

Разработке технологического процесса изготовления детали предшествует изучение ее служебного назначения и технических требований, заданных конструктором. Изучение служебного назначения детали осуществляется на основе анализа процесса, в котором участвует деталь, условий его протекания, чертежей детали и сборочной единицы, в которую входит деталь. Понимание служебного назначения детали необходимо для определения соответствия ему конструкции, материала и заданных технических требований на деталь.

По результатам анализа в случае необходимости вносят соответствующие коррективы в конструкцию детали, простановку размеров, допуски и другие технические требования.

Рассмотрим в качестве примера деталь "Шестерня вала коробки отбора мощности" автомобиля, рабочий чертеж которой приведен на рис. 2.3.1.

Как следует из фрагмента сборочного чертежа коробки отбора мощности (рис. 2.3.2), шестерня 1 предназначена передавать вращение и крутящий момент, а также воспринимать радиальные нагрузки и скручивающий момент. В служебном назначении шестерни должны быть отражены значения частот вращения, крутящего момента, сил и моментов, воздействующих на шестерню, температурный режим и др.

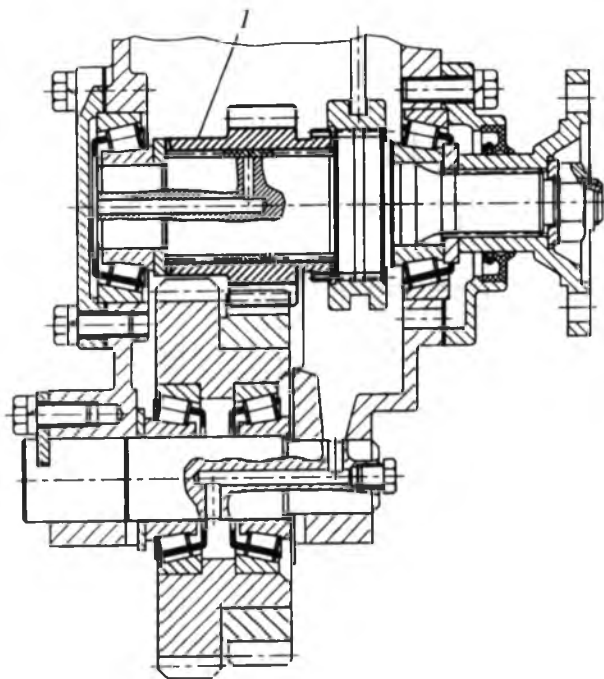


Рис. 2.3.2. Фрагмент сборочного чертежа коробки отбора мощности

Все это позволяет оценить, соответствуют ли этим характеристикам ее конструкция, качественные характеристики материала, требования к геометрической точности, качеству поверхностного слоя и др. Например, зная передаваемый крутящий момент и пятно контакта, можно определить удельное давление на зуб шестерни и установить соответствие материала шестерни и т.д.

Представление детали совокупностью модулей поверхностей (МП) существенно упрощает понимание как конструкции детали, так и технических требований, в связи с чем на рис. 2.3.3 представлен чертеж шестерни в модульном исполнении, на котором показано функциональное назначение каждой поверхности, сочетания поверхностей детали, совместно выполняющих соответствующие служебные функции, размерные связи между поверхностями внутри МП и между МП, конструкторские базы.

Как следует из чертежа, передачу вращения и крутящего момента шестерня осуществляет с помощью зубчатого венца эвольвентного зацепления, а для ее включения предусмотрены шлицы. В соответствии с

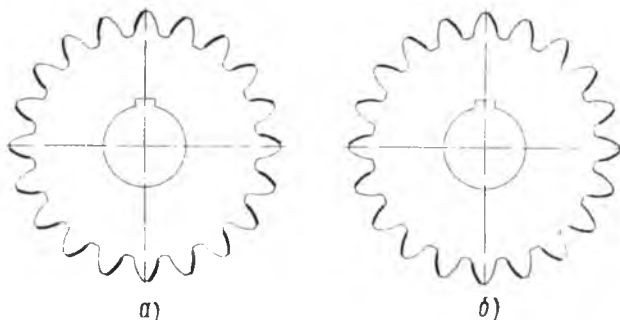


Рис. 2.3.4. Рабочие МП зубчатого венца шестерни:

а – 22Р22; *б* – 24Р22

этим она имеет четыре рабочих МП: 25Р22, 27Р22 (боковые поверхности шлицев) и 22Р22, 24Р22 на зубчатом венце, представляющих собой наборы эвольвентных участков всех зубьев на каждой стороне венца (для вращения в одну и другую сторону). На рис. 2.3.4, *а* и *б* показаны модули 22Р22 и 24Р22 зубчатого венца, выделенные толстыми линиями.

Шестерня базируется в коробке отбора мощности (см. рис. 2.3.2) с помощью модуля 1Б311 (см. рис. 2.3.3), образованного правым торцом и двумя цилиндрическими внутренними поясками под игольчатые подшипники. Таким образом, модуль 1Б311 является комплектом основных баз, лишаящим шестерню пяти степеней свободы и оставляющий ей возможность вращения.

Здесь надо отметить, что два внутренних цилиндрических пояска, входящих в состав модуля 1Б311, одновременно являются и рабочими модули 20Р121, 21Р121, как и оба торца 2Р112, 17Р112, так как все они участвуют в процессе вращения шестерни. Поэтому к качеству поверхностного слоя поверхностей этих МПР предъявляются дополнительные требования, их твердость должна находиться в пределах 59...63 HRC при твердости сердцевины 37...47 HRC.

На обоих торцах шестерни располагаются модули 5Р21, 16Р21 в виде канавок, выполняющих роль каналов для прохода масла.

Все остальные поверхности шестерни образуют связующие модули поверхностей: 6С122, 8С122, 10С122, 11С122, 12С122, 14С122, 15С122; 13С112, 18С112; 4С121, 9С121, 19С121 и группы 23С21 и 26С21 – канавки соответственно между зубьями и шлицами, которые совместно с модулями 22Р22, 24Р22 и 25Р22, 27Р22 образуют зубья зубчатых венцов и шлицы.

В соответствии со служебным назначением шестерни и ее МП установим размерные связи в виде координирующих размеров МП, координирующих размеров поверхностей каждого МП, размеров поверхностей и габаритных размеров (условные обозначения перечисленных размеров приведены в п. 1.4.2).

Габаритными размерами шестерни является линейный размер 67,8; к размерам поверхностей относятся $\varnothing 48$; $\varnothing 56,3$; $\varnothing 87,41$; $\varnothing 58$; $\varnothing 64,3$; $\varnothing 57,3$, а также размеры канавок, фасок, скруглений (см. рис. 2.3.3).

К координирующим размерам поверхностей, составляющих модули поверхностей, относятся следующие:

1. У модуля 1Б311 – два угловых размера по 90° , определяющих в вертикальной и горизонтальной плоскостях положение торца относительно оси ближайшего цилиндрического пояска $\varnothing 48$, а также четыре координирующих размера (два угловых и два линейных), определяющих положение оси левого цилиндрического пояска $\varnothing 48$ относительно оси правого цилиндрического пояска тоже в вертикальной и горизонтальной плоскостях, при этом линейные координирующие размеры имеют номинальную величину, равную 0, а угловые размеры – 90° .

2. У модулей 22Р22 и 24Р22 координирующими размерами являются размеры, устанавливающие расстояние между эвольвентными участками зубьев и описываемые группой размерных характеристик в соответствии с положениями теории зацепления; изложенное относится и к модулям шлицев.

Все остальные размеры шестерни относятся к категории координирующих размеров МП.

Для определения координирующих размеров МП на основе анализа служебного назначения шестерни и ее МП установим конструкторские базы каждого МП и на этом основании построим граф МП.

Модули 22Р22, 24Р22, 25Р22, 27Р22 должны быть заданы относительно 1Б311, чтобы обеспечить требуемое качество зубчатого зацепления и шлицевого соединения;

- модуль 5Р21 должен быть задан относительно 1Б311, а модуль 16Р21 – относительно модуля 18С112, чтобы обеспечить минимальную погрешность глубины канавок;

- модули 9С122, 15С122 должны быть заданы относительно 1Б311 для обеспечения требуемой толщины стенки;

- модуль 2Р112 должен быть задан относительно 1Б311, так как он входит в линейную размерную цепь, обеспечивающую возможность вращения шестерни;

– модуль 4C121 должен быть расположен концентрично с осью цилиндрических внутренних поясков шестерни и поэтому должен быть задан относительно 1B311;

– модули 18C112 и 11C122 должны быть заданы относительно 1B311, так как они образуют габаритные размеры шестерни по длине и диаметру;

– модули 10C122, 12C122, 13C112, 23C21 формируют вместе с 22P22 и 24P22 зубья большого венца, но поскольку каждый из модулей 22P22 и 24P22 заданы относительно 1B311; условно примем, что перечисленные связующие модули заданы относительно 24P22;

– модули 8C122, 26C21 и 7P22 аналогично должны быть заданы относительно 27P22 малого венца;

– модули 3C121, 19C121 – фаски и 6C122 должны быть заданы относительно модуля 1B311;

– модуль 14C122 должен быть задан относительно модуля 15C122.

На основании изложенного был построен граф МП (рис. 2.3.5) шестерни.

В соответствии с графом МП на чертеже шестерни (см. рис. 2.3.3) в модульном исполнении были проставлены сначала размеры, координирующие положение каждого МП относительно МП, являющегося его конструкторской базой. Далее нанесены размеры, координирующие относительное положение поверхностей внутри каждого МП, и затем размеры поверхностей и габаритные размеры. Чтобы проставить координирующие размеры МП, на его поверхностях надо построить координатные системы. В качестве примера на рис. 2.3.6 показаны модули 1B311, 10C122 с построенными на них координатными системами.

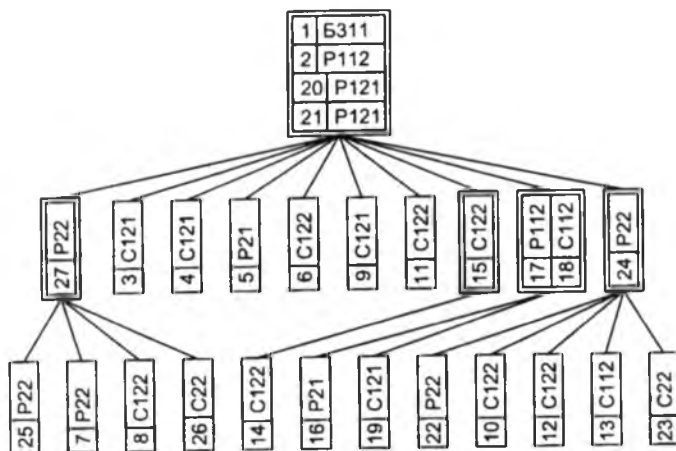


Рис. 2.3.5. Граф МП шестерни

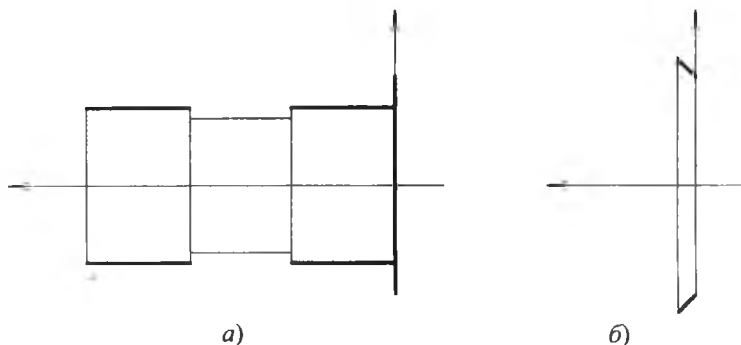


Рис. 2.3.6. МП с координатными системами:

а – 1Б311; б – 10С122

Зная нагрузки, которые воспринимает деталь, и ее участие в рабочем процессе, можно установить, насколько правильно выбран материал и сформулированы технические требования.

Рассмотрим технические требования, приведенные на заводском чертеже шестерни (см. рис. 2.3.1). К ним относятся допуски на размеры, а также технические требования, заданные в текстовой форме. Как следует из чертежа, в содержание технических требований входят методы и способы достижения этих технических требований, хотя они относятся к технологии изготовления и (строго говоря) на чертежах деталей не должны присутствовать; их наличие объясняется условностями, принятыми на предприятии.

Примерами изложенного могут служить технические требования в п.п. 1 и 3 пояснений, приведенных на заводском чертеже шестерни (см. рис. 2.3.1). На чертеже указывают не только твердость поверхностей *A*, *Д* и *Е*, но и пути ее достижения: "нитроцементировать $h = 0,8 \dots 1,1$ мм; 59...63 HRC. На поверхности *A* и торцах *Д* и *Е* не менее 0,6 мм; сердцевины 37...47 HRC".

Указываются также в другом пункте не только метод упрочнения зубьев, но и способ контроля: "зубья шестерни упрочнить наклепом стальной дробью 0,8...1,2 мм. Интенсивность обработки проверять контрольной пластиной типа *A* со стрелой прогиба 0,62...0,7 мм". В связи с вышеизложенным из технических требований следует исключить все, что связано с технологией изготовления шестерни.

Наличие же чертежа шестерни в модульном исполнении с графом МП позволяет технологу быстро понять конструкцию детали, размерные связи поверхностей и оценить соответствие конструкции и заданных технологических требований ее служебному назначению.

2.3.2. ВЫБОР ВИДА И ОРГАНИЗАЦИОННОЙ ФОРМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

Исходными данными для выбора вида и организационной формы производственного процесса является производственная программа, которая характеризуется номенклатурой и объемом выпуска деталей каждого наименования. Виды и организационные формы производственного процесса и области их применения подробно изложены в главе 1.13.

В современных условиях, когда производственная программа в значительной степени непредсказуема, а выпускаемая продукция отличается широкой номенклатурой и разной серийностью, выбор какой-либо одной организационной формы приводит к низкой эффективности производственного процесса.

Действительно, если в одном квартале номенклатура изготавливаемых деталей будет широкой, а в другом квартале – небольшой, но большего объема, то организационная форма производственного процесса, оптимальная для первого квартала, будет неэффективной в другом квартале. Это свидетельствует о том, что в этих условиях организационная форма должна быть гибкой.

Гибкость организационной формы производственного процесса заключается в возможностях изменения уровня специализации рабочих мест, что позволит изменять маршрут движения заготовок по рабочим местам при одном и том же технологическом процессе.

В традиционном производстве изменение уровня специализации рабочего места (РМ) достигается за счет замены технологических систем (ТС) или их МФТ. Например, если требуется незначительно изменить уровень специализации РМ, то у ТС технологическую оснастку заменяют на другую; если требуется существенно изменить уровень специализации РМ, то заменяют ТС (например, вместо универсальных ТС устанавливают специализированные ТС). Однако такой путь практически нереализуем из-за необходимости иметь большой резерв оборудования; в итоге предприятие продолжает работать с тем же оборудованием, лишь в некоторых случаях изменив его расстановку и оснастку.

В традиционном производстве возможность изменения маршрута движения заготовок по РМ обеспечивается за счет универсальности РМ: чем выше уровень универсальности РМ, тем больше вариантов маршрутов движения заготовок. В пределе заготовка может обрабатываться на любом РМ, однако при этом, как уже отмечалось, не будет востребована значительная доля возможностей РМ и это приведет к большим расхо-

дам. В итоге приобретенная таким путем гибкость оказывается не эффективной.

Использование принципов модульной технологии позволяет существенно повысить гибкость организационной формы производственного процесса. Модульная технология открывает перспективы применения поточного вида организации производственного процесса даже в условиях единичного производства за счет того, что позволяет объединять в группы детали разной конструкции по общности содержащихся в них МП и специализировать рабочие места под их изготовление.

Для решения этой задачи необходимо представление производственной программы выпуска деталей на модульном уровне. С этой целью в дополнение к информации о номенклатуре деталей с их объемами выпуска каждая деталь представляется совокупностью МП, которая для наглядности представляется в виде гистограммы МП. В итоге строится сводная гистограмма МП всех деталей производственной программы (см. рис. 1.4.14, а деталей автомобилей).

В зависимости от масштаба выпуска выбирается соответствующий уровень специализации рабочих мест. Рабочее место (РМ) представляет собой элементарную единицу структуры предприятия, где размещается исполнитель работ, обслуживаемое технологическое оборудование и оснастка, заготовки, подъемно-транспортные устройства, средства механизации и автоматизации. РМ в условиях модульной технологии предназначено для осуществления технологических операций, состоящих из набора МТИ для изготовления МП.

Принципиальное отличие организации производственного процесса в условиях модульной технологии заключается в применении поточного вида в производстве любой серийности, специализации рабочих мест не под методы обработки, а под изготовление определенных МП по заданной технологии МТИ. При этом производственный участок (цех) рассматривается как технологическое поле, представляющее собой совокупность специализированных РМ. В этом поле от одного РМ к другому перемещаются заготовки в соответствии со своими маршрутными технологическими процессами.

В зависимости от масштаба выпуска выбирается соответствующий уровень специализации рабочих мест, их количество и схема расстановки. Если производство ближе к крупносерийному или массовому, то уровень специализации рабочих мест должен быть высоким и они устанавливаются в виде поточной линии.

Если производство ближе к мелкосерийному и единичному, то уровень специализации рабочих мест будет ниже, а их расстановка будет зависеть от разработанных обобщенных маршрутов движения заготовок.

Для реализации такого метода организации производства необходимо станочное оборудование, специализированное под модульную технологию [2]. Оно отличается тем, что подобно операционным станкам создается или подбирается из имеющегося под изготовление только определенных МП по заданной технологии. Но в отличие от операционных станков их конструкция должна базироваться на агрегатном принципе, что позволит придать им гибкость и по мере необходимости быстро их переконфигурировать под другой уровень специализации.

Поскольку предприятия на данный момент имеют только традиционное станочное оборудование, то его можно использовать под модульную технологию двумя путями: заменять технологическую оснастку или у универсального оборудования использовать лишь часть его возможностей.

Например, если на токарно-револьверном станке можно изготовить восемь наименований МП: Б211, Б221, Б311, Б41 и Б212, Б222, Б312, Б42, то такие станки можно использовать под изготовление меньшего числа наименований МП в соответствии со специализацией рабочих мест. К примеру, на одном станке будут изготавливать модули Б211, Б221, Б311, Б41, а на другом станке – Б212, Б222, Б312, Б42.

Такая организация производственного процесса при изменениях программы выпуска позволяет легко изменять уровень специализации рабочих мест.

2.3.3. ВЫБОР МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВКИ

Имея отработанный рабочий чертеж, технические требования, которым должна отвечать готовая деталь, и зная количество деталей, подлежащих изготовлению в единицу времени по неизменяемому чертежу, приступают к выбору экономичного вида полуфабриката (прокат, стальные слитки, порошковые материалы и др.) и метода получения заготовки детали.

В одних случаях можно изготавливать заготовку, максимально приближающуюся по качественным показателям (размерам, форме, шероховатости поверхности, механическим свойствам, химическому составу, качеству поверхностного слоя материала) к требованиям готовой детали, что сокращает потери, связанные с ее превращением в готовую деталь. Однако стоимость такого полуфабриката возрастает с увеличением сте-

пени его приближения к требованиям готовой детали и повышением уровня самих этих требований.

Другие полуфабрикаты или заготовки, отличающиеся меньшей степенью приближения к требованиям готовой детали, стоят меньше, но требуют больших последующих расходов по их превращению в готовую деталь (например, путем обработки резанием).

Следовательно, из нескольких возможных вариантов превращения полуфабриката в готовую деталь необходимо использовать наиболее экономичный.

Вопрос о выборе полуфабриката и варианте превращения его в готовую деталь должен решаться на основе сравнения себестоимости детали при каждом из возможных вариантов. При одних и тех же требованиях к готовой детали себестоимость механической обработки обычно выше себестоимости получения заготовок. Чем дальше отстоят размеры и другие показатели качества заготовок от требований к готовой детали, тем в большей степени возрастает себестоимость обработки заготовок резанием и потери материала; по мере приближения заготовок к требованиям готовой детали себестоимость их последующей обработки довольно быстрее снижается.

Современный прогресс в развитии и совершенствовании технологических процессов и средств производства порождает непрерывное сокращение (при прочих равных условиях) себестоимости и повышение качества полуфабрикатов и заготовок.

Изложенное направление является одним из ведущих в развитии современной технологии машиностроения. Учитывая это, надо при выборе полуфабриката стремиться к получению полуфабриката, максимально приближающегося по качественным показателям к соответствующим показателям требований, предъявляемых к готовой детали. В связи с этим разрабатывают несколько вариантов процессов получения заготовки и выбирают тот, при котором получается наименьшая себестоимость.

Современное машиностроение выпускает широкую номенклатуру сортового и профильного материала, из которой для ряда деталей подбирают необходимые полуфабрикаты.

Если для изготовления детали нельзя подобрать полуфабрикат, позволяющий превратить его сразу в готовую деталь, приходится выбирать другой вид полуфабриката, позволяющего превратить его сначала, с наименьшими потерями и расходами, в заготовку, приближающуюся по требованиям к готовой детали, а затем в готовую деталь. В таких случаях в качестве полуфабриката используются металл в слитках, сортовой материал в виде прутка, листа, ленты или проволоки для изготовления кова-

ных, штампованных, сварных, редуцированных, высаженных, штампо-сварных, литейно-сварных и других видов заготовок.

Выбор методов получения заготовки. В современном машиностроении для получения заготовок деталей используется большое количество разнообразных технологических процессов и их сочетаний. Основными из этих процессов являются: 1) различные способы литья (в песочные формы, в опоки, кокильное, центробежное, по выплавляемым моделям, в оболочковые формы, под давлением, с использованием вакуума); 2) различные способы пластической деформации металлов (свободная ковка, ковка в подкладных штампах, штамповка на молотах и прессах, периодический и поперечный прокат, высадка, выдавливание); 3) резка; 4) сварка; 5) пайка; 6) комбинированные способы штамповки-сварки, литья-сварки и т.д.; 7) порошковая металлургия и др.

Выбор полуфабриката и разработка технологического процесса его превращения в готовую деталь дают наиболее высокие технико-экономические показатели, если эти вопросы разрабатываются комплексно и одновременно с разработкой конструкции изделия и его деталей.

В результате совместной работы конструктора и технолога разрабатывается оптимальный вариант и создается наиболее технологичная конструкция детали и изделия в целом. Главными факторами, влияющими на выбор метода получения заготовки, является конструкция детали, ее материал, размеры и масса заготовки, количество выпуска деталей в единицу времени, стоимость полуфабриката, расход материала и себестоимость превращения заготовки в готовую деталь и в итоге себестоимость заготовки.

В практике машиностроения нашли применение многочисленные методы получения заготовки, многие из которых с рекомендациями по их выбору приведены в работе [11]. На выбор метода получения заготовки большое влияние оказывают конструкция детали, ее размеры и материал.

Корпусные детали. Корпусные детали отличаются большим разнообразием конструктивных форм, размеров, массы и материалов, используемых для их изготовления. В настоящее время наиболее распространенными технологическими процессами изготовления заготовок корпусных деталей являются литье, в меньшей степени – резка-гибка, сварка, штампо-сварка и литье-сварка.

Основные *преимущества* получения заготовок – относительно небольшие расходы на изготовление опок, приходящиеся на одну отливку; *недостатки*:

невысокая точность отливок, являющаяся следствием использования деревянных моделей, увеличения размеров и искажения форм, получаемых при "расталкивании" моделей перед их изъятием из форм;

недостаточно высокая точность изготовления стержней и сборки форм; большие литейные уклоны, большая трудоемкость, длительный цикл формовки, искажения отливки вследствие неравномерного уплотнения формы в различных ее частях.

Эти особенности ограничивают область экономичного использования рассматриваемого способа литья производством единичных или изготавливаемых в небольших количествах крупных деталей, а также заготовок, которые не могут быть получены с помощью других способов. Примерами таких деталей могут служить станины, траверсы и стойки тяжелых станков, станины шестеренных клетей, корпуса редукторов, станины силовых лебедок, статоры, крышки гидротурбин и др.

При изготовлении отливок корпусных и других деталей в машиностроении используются процессы, значительно приближающие заготовки к требованиям, предъявляемым к готовым деталям. Основным из них является литье в оболочковые формы (оболочковые вставки), изготавливаемые из химически твердеющих смесей с жидким стеклом.

Достаточно широко для получения заготовок крупных деталей применяют комбинированный метод, когда заготовку делят на ряд простых частей, каждая из которых получается при помощи литья. Последующей сваркой отдельные части соединяются с образованием литейно-сварной заготовки детали.

Основными преимуществами рассмотренных способов получения заготовок является устранение расходов на изготовление дорогостоящих моделей, значительное сокращение цикла изготовления, экономия металла и обычно меньшая трудоемкость изготовления. Многие ответственные сварные заготовки корпусных деталей сложных конструктивных форм требуют отжига для снижения остаточных напряжений, образующихся при сварке.

Несмотря на отмеченные недостатки, эти способы получения крупных заготовок находят достаточно широкое применение, особенно при изготовлении деталей больших габаритных размеров и массы, литье которых целиком трудновыполнимо, требует много времени и связано с риском получения неисправимого брака.

Менее крупные заготовки детали получают с помощью литья в опоках (двух и более) с использованием ручной, пескометной и машинной формовок. Ручная формовка даже с использованием пневматических трамбовок и других средств механизации отличается малой производительностью и получением отливок относительно невысокой точности. Поэтому она используется в основном при получении заготовок деталей, изготавливаемых единично или в малых количествах.

Машинная формовка по сравнению с ручной имеет преимущества: 1) более высокая точность форм при удалении из них моделей; 2) возможность уменьшения формовочных уклонов; 3) получение форм с большой прочностью и однородностью уплотнения вследствие механизации уплотнения; 4) меньшая трудоемкость формовки с использованием менее квалифицированного труда.

В результате применения машинной формовки отливки получаются более точными по размерам и геометрическим формам, с меньшими колебаниями по массе.

Достаточно широкое применение находит получение заготовок корпусных деталей, столов, плит с помощью кокильного литья, при котором используется сочетание металлической формы с песчаным стержнем. Экономическая эффективность этого вида заготовок в значительной степени зависит от стоимости изготовления постоянных металлических форм.

Заготовки, полученные кокильным литьем, характеризуются точностью и правильностью геометрических форм (меньшими допусками на обработку и меньшими их колебаниями). Результатом являются экономия металла и сокращение трудоемкости механической обработки отливок.

Для изготовления литых заготовок мелких корпусных и ряда других деталей используется литье под давлением до 10 МПа и более.

Это позволяет сократить трудоемкость механической обработки отливок, получаемых литьем под давлением, на 80...85 % по сравнению с обычными литыми заготовками.

Для изготовления заготовок ряда корпусных и других деталей средних размеров используют штамповку, сварку, резку, гибку. Заготовки детали предварительно делят на несколько более простых частей. Отдельные части изготавливаются из листового, ленточного, сортового или профильного материала путем резки, гибки, штамповки, затем соединяют сваркой, образуя заготовки деталей.

Основным преимуществом деталей, изготовленных из таких заготовок, является наиболее полное использование свойств материалов, вследствие чего достигается уменьшение массы деталей и отходов, и незначительный цикл изготовления деталей по сравнению с литьем. Недостатком данного способа является необходимость отжига заготовок для снижения остаточных напряжений, возникающих при сварке с целью уменьшения деформации деталей.

Заготовки для валов. Использование в качестве заготовки круглого проката экономично только для изготовления гладких и ступенчатых валов с небольшой разницей в диаметрах шеек, так как в противном случае получаются значительные отходы металла в стружку и затраты на обра-

ботку резанием. Заготовки для многоступенчатых и коленчатых валов, изготавливаемых единицами, получают при помощи свободнойковки, ковочными молотами и прессами.

Большее приближение заготовок к требованиям, предъявляемым к готовым деталям, достигается путем их штамповки в открытых и закрытых штампах. Штампы делаются одноручьевыми и многоручьевыми.

Относительно высокая стоимость изготовления и содержания штампов, особенно многоручьевых, делает экономичным использование штамповки на штамповочных молотах при крупносерийном и массовом производстве валов и других подобных деталей.

Для изготовления в значительных количествах ряда валов небольших габаритных размеров применяют экономичный способ получения заготовок на горизонтально-ковочных машинах. В качестве исходного полуфабриката для получения заготовок обычно используются круглые прутки, полученные прокаткой.

Значительного внимания и распространения заслуживает использование поперечно-винтовой прокатки для получения заготовок многоступенчатых валиков, полуосей автомобилей и других деталей.

Литые заготовки применяются для получения валов прокатных станков, шпинделей и пинолей ряда тяжелых станков и т.д. В зависимости от служебного назначения вала, его конструктивных особенностей и количеств, подлежащих изготовлению в единицу времени и по неизменяемому чертежу, выбирают соответствующий метод получения литых заготовок.

Для получения более качественных литых заготовок пустотелых валов используется центробежный способ литья, при котором заготовка получает требуемую форму путем использования центробежной силы расплавленного металла, создаваемой вращением изложницы вокруг ее оси. При этом внутренняя поверхность самой отливки всегда получается цилиндрической или в виде параболоида вращения (при вертикальной оси вращения изложницы).

Заготовки зубчатых колес. При изготовлении зубчатых колес небольшого диаметра (до 60...80 мм) с небольшой разницей диаметров зубчатого венца и ступицы считается экономичным использование в качестве заготовок калиброванных прутков материала.

Изготовление зубчатых колес диаметром больше 80 мм из прутка становится не экономичным из-за увеличения отходов металла и себестоимости изготовления. Для получения штучных заготовок с диаметром свыше 80 мм в зависимости от размеров, материала, конструктивных форм и потребного количества могут использоваться свободнаяковка,

штамповка в подкладных, открытых и закрытых штампах, на ковочных молотах и прессах, штамповочных молотах и кривошипных прессах, на горизонтально-ковочных машинах.

С увеличением количества зубчатых колес, подлежащих изготовлению, становится экономичным использование штамповки в открытых штампах, осуществляемой на штамповочных молотах и прессах или на более производительных кривошипных прессах.

Штампованные заготовки, получаемые на штамповочных молотах, отличаются меньшими припусками на обработку и колебанием их величин по сравнению с получаемыми свободной ковкой и в подкладных штампах.

С увеличением размеров зубчатых колес, изготавливаемых единицами или в небольших количествах, можно использовать свободную ковку.

Заготовки деталей типа рычагов, шатунов, вилок, профильных стержней и т.п. При получении литых чугунных заготовок для перечисленных деталей в зависимости от их количества и размеров используется песчаная формовка, в опоках, ручная и машинная.

Заготовки ряда деталей, особенно сложных конструктивных форм и небольших габаритных размеров, экономично получать при помощи литья по выплавляемым моделям. Заготовки мелких рычагов, собачек, балочек, лопаток роторов газовых турбин и ряда других деталей отливаются этим способом даже при изготовлении небольших количеств заготовок.

Стальные заготовки рассматриваемых типов деталей получают свободной ковкой при изготовлении единичных заготовок или нескольких их штук. С увеличением количества заготовок, подлежащих изготовлению по неизменяемому чертежу, становится экономичным использовать подкладные штампы для формообразования заготовки в целом, или отдельных, более сложных ее частей (например, концов рычага).

При больших количествах заготовок, особенно в массовом производстве, экономично использовать штамповку в открытых и тем более в закрытых штампах.

Для получения заготовок, максимально приближающихся к требованиям готовых деталей, используются калибровка и чеканка штампованных заготовок. Практически при многократной чеканке достигается точность размеров по высоте заготовки до ± 25 мкм.

Заготовки мелких и крепежных деталей. Мелкие и крепежные детали составляют большую номенклатуру самых разнообразных деталей. Примерами могут служить различного рода кулачки, угольники, тройники

ки, шурупы, резьбовые втулки, болты, гайки, винты, шпильки, шурупы, шпонки. Мелкие детали изготавливаются из различных металлов, сплавов, пластмасс и других материалов.

Группирование мелких деталей по служебному назначению, размерам, подобию конструктивных форм и техническим требованиям к этим деталям создает предпосылки для их группового изготовления. В таких случаях становится экономичным использование в качестве заготовок профильного материала. При отсутствии специального профильного проката материалы специального профиля экономично получать при помощи сравнительно простых приспособлений. Такие приспособления закрепляются на протяжных или волочильных станах. Нагретый прутки материала стандартного профиля путем протягивания между роликами приспособления превращается в прутки специального профиля.

Одним из наиболее экономичных технологических процессов получения заготовок крепежных и других видов мелких деталей, выпускаемых в больших количествах, является их холодная высадка на специальных холодно-выставочных автоматах.

2.3.4. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ И ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Перед тем как разрабатывать технологический процесс, технолог должен оценить технологичность конструкции детали, ее материал, технические требования с точки зрения возможности и эффективности изготовления детали в производственных условиях предприятия.

Большое влияние на технологию изготовления детали оказывает конструкция МП, поскольку законы технологии предъявляют свои требования к поверхностям, входящим в их состав. Опытный конструктор, проектируя деталь, в какой-то мере уже предусматривает технологию ее изготовления, вводя соответствующие технологические поверхности, поэтому у детали встречаются поверхности, не относящиеся ни к одному из трех классов МП, определяемых служебным назначением детали.

Появление на детали технологических поверхностей в одних случаях объясняется стремлением повысить эффективность изготовления, а в других случаях – обеспечить физическую возможность изготовления детали. Например:

– канавка (рис. 2.3.7, *а*) на детали необходима в одном случае для выхода инструмента, а в другом случае – для обеспечения получения прямого угла между образующей цилиндрической поверхности и торцом;

– большая протяженность базирующей поверхности типа двойной направляющей вызывает трудности обеспечения ее точности, в то время как для выполнения ею своего служебного назначения достаточно иметь два цилиндрических пояска по краям этой поверхности (рис. 2.3.7, *б*, *в*), поэтому в этом случае предусматривают выточку, которая рассматривается как связующая поверхность, но по своему назначению является технологической и связана с базирующим модулем.

Аналогичное решение можно наблюдать у деталей, имеющих плоские поверхности большой площади. Также делают выборку поверхности (рис. 2.3.7, *г*), занижая ее по размеру, тогда установочная база формируется только по периметру детали. В этом случае тоже появляется связующая поверхность, связанная с базирующим модулем, выполняющая роль технологической поверхности.

В ряде случаев появление технологических поверхностей обусловлено физической необходимостью для получения на детали базирующих, рабочих или связующих поверхностей. Таким примером является шпоночный паз, который служит в качестве опорной базы для лишения детали, например, зубчатого колеса, одной степени свободы – вращения на валу. Для этой цели требуется лишь одна из боковых поверхностей шпоночного паза, входящая в контакт с боковой поверхностью шпонки вала (рис. 2.3.8, *а*). Однако изготовить ее нельзя без изготовления других поверхностей шпоночного паза, не принимающих участия в выполнении

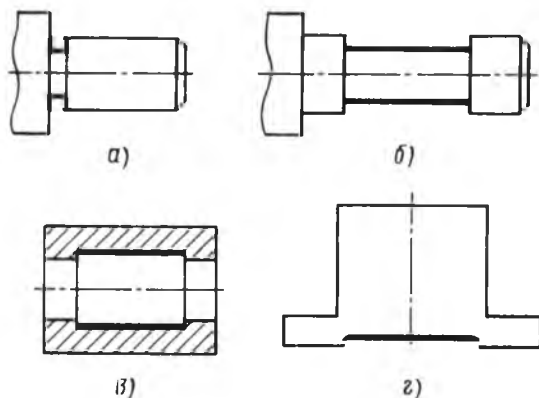


Рис. 2.3.7. Технологические поверхности:

а – канавка; *б* – выточка на наружной поверхности; *в* – выточка на внутренней поверхности; *г* – выборка на плоской поверхности

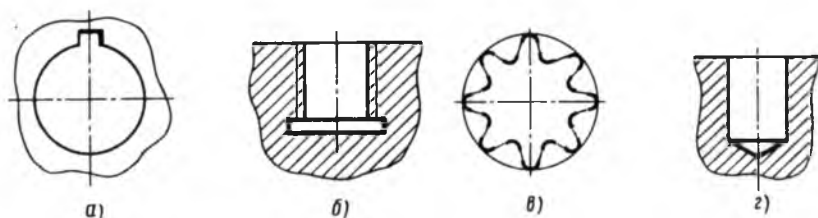


Рис. 2.3.8. Технологические поверхности:

а – поверхности шпоночного паза; *б* – канавка; *в* – поверхность зуба;
г – коническая поверхность

служебных функций детали. Для того чтобы нарезать резьбу в отверстии метчиком, необходимо для выхода метчика отверстие сделать длиннее, чем длина резьбы. Если резьбу изготавливают резцом, то нужна канавка для выхода резца (рис. 2.3.8, б) и т.д.

В качестве технологических поверхностей в ряде случаев можно рассматривать и различного рода фаски, в функцию которых входит устранение заусенцев, обусловленных применяемым методом обработки, или использование их для облегчения направления детали во время сборки. Примерами являются части поверхности зуба, не являющиеся эвольвентной частью его поверхности (рис. 2.3.8, в), но получающиеся при нарезке зубьев традиционными методами, или конические поверхности (рис. 2.3.8, г), получающиеся при изготовлении глухих отверстий сверлом и т.д.

Следует отметить, что не всегда конструктор на рабочих чертежах деталей предусматривает технологические поверхности, и тогда технолог должен внести соответствующие коррективы в чертеж детали. В этом случае это будет проработкой детали на технологичность.

Из приведенных примеров следует, что между определенными модулями поверхностей имеются тесные связи и их целесообразно обрабатывать совместно на одной операции, за один установ, так же, как все поверхности одного МП. В связи с этим возникла необходимость объединения некоторых МП в соединение, получившее название **модуля поверхностей интегрального (МПИ)**.

Другими причинами объединения нескольких МП является стремление снизить разнообразие и количество модулей поверхностей, составляющих деталь, что также повышает технологичность детали, так как позволяет снизить разнообразие требуемых средств технологического обеспечения, а также число настроек технологических систем.

Снижение разнообразия и количества МП достигается за счет дополнения МПБ, являющихся неполными комплектами баз, до условно-полного и за счет объединения нескольких МПС в модуль, подобный по конструкции одному из типовых МПБ или МПР.

Среди базирующих МП большая доля МП являются неполным комплектом баз, а среди МПС большинство содержат одну-две поверхности, к которым, как правило, не предъявляют высоких требований по точности. Эти обстоятельства открывают возможность формировать МП или МПИ, добавляя к неполным комплектам баз базирующих модулей связующие модули в качестве недостающих поверхностей.

Статистика показывает, что наиболее высокие требования по качеству предъявляются к МПБ, МПР и редко к МПС. Поскольку МПР содержится у малого числа деталей изделия, а МПБ присутствует у каждой, то наиболее часто МПИ строятся на основе МПБ.

Учитывая, что процесс формирования МПИ детали из ее конструкторских МП оказывает существенное влияние как на номенклатуру, так и на количество МПИ у детали, его следует считать важным этапом в подготовке исходных данных для разработки модульного технологического процесса и при организации МПИ придерживаться следующих рекомендаций:

• 1. Формирование МПИ должно осуществляться:

а) присоединением к МПБ или к МПР связующих модулей, состоящих из технологических поверхностей;

б) присоединением к МПБ, являющимся неполным комплектом баз, МПС в виде недостающих поверхностей для образования полного комплекта баз;

в) объединением нескольких МП, образующих типовую конструкцию МПБ, МПР.

• 2. При составлении МПИ запрещается разъединять поверхности, принадлежащие одному МП.

Как показывает накопленный опыт, наиболее часто МПИ формируются путем присоединения к МПБ связующих МП, реже МПС присоединяются к МПР, еще реже МПБ объединяются с МПР или МПС объединяется с МПС.

• 3. После формирования всех МПИ детали необходимо произвести корректировку размеров и допусков как в пределах каждого МПИ, так и детали в целом.

Рассмотрим формирование МПИ на примере шестерни вала коробки отбора мощности.

На рис. 2.3.3 показан чертеж шестерни в модульном исполнении. Согласно вышеперечисленным рекомендациям, сформируем МПИ шестерни. После просмотра всех МП, начиная с первого модуля, были получены следующие МПИ:

1МПИБ311 представляет собой сумму модулей 1Б311 (20Р121, 21Р121, 2Р112), 3С121 и 4С121, объединенных тем, что они будут изготавливаться совместно:

$$3\text{МП}ИР22 = 27Р22 + 25Р22 + 26С21,$$

которые получаются при нарезании шлицев;

$$9\text{МП}ИР22 = 22Р22 + 24Р22 + 23С21,$$

получаемые при нарезании зубьев;

$$11\text{МП}ИВ'312 = 13С112 + 14С122 + 15С122,$$

образующие модуль поверхностей, эквивалентный по конструкции МПБ312 и в отличие от последнего иметь штрих в обозначении;

$$13\text{МП}ИВ'311 = 18С112(17Р112) + 19С121,$$

образующие модуль поверхностей, эквивалентный по конструкции неполному МПБ311.

После формирования МПИ получили чертеж шестерни как совокупности МПИ и оставшихся без изменения МП (рис. 2.3.9), где уже другая нумерация модулей, например, бывший 5Р21 (рис. 2.3.3) стал 2Р21 и т.д.

2.3.5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

Методика разработки традиционных единичных технологических процессов имеет ряд существенных недостатков. Главный недостаток состоит в том, что в основу выбора последовательности изготовления детали положен геометрический принцип, т.е. деталь рассматривается как совокупность независимых элементарных геометрических поверхностей. Отсюда возникает избыточное множество вариантов последовательности изготовления этих поверхностей и, как следствие, многовариантность технологических процессов изготовления одной детали.

В то же время технолог, понимая наличие связей между отдельными поверхностями, обусловленных совместным выполнением служебных функций, предусматривает их изготовление на одной операции или на разных операциях путем построения и расчета технологических размерных цепей. Однако степень учета этих взаимосвязей во многом зависит от опыта

и квалификации технолога и потому носит субъективный характер. Это обстоятельство снижает качество технологического процесса, увеличивает трудоемкость, сроки его отладки и внедрения в производство.

В итоге методика разработки технологических процессов носит в основном рекомендательный характер, не содержит строгих правил и отличается низким уровнем формализации. Последнее создает большие трудности при автоматизации разработки технологических процессов.

Методика построения модульного технологического процесса позволяет свести к минимуму указанные недостатки. Это является результатом того, что деталь описывается не множеством элементарных поверхностей, а совокупностью МП, где поверхности уже объединены по признаку совместного выполнения служебных функций с указанием конструкторских баз каждого МП.

Как отмечалось в начале гл. 2.3, модульный процесс объединяет в себе преимущества единичного, типового и группового процесса, приобретая дополнительно гибкость. *Все эти преимущества обеспечиваются методикой разработки модульного технологического процесса, в основу которой положены следующие основные принципы:*

1. Деталь должна быть представлена совокупностью МП и МПИ.
2. Все поверхности одного МП или МПИ должны изготавливаться на одной операции, желательно с одного установа.
3. Технологический процесс должен учитывать все особенности детали.
4. Технологическая операция должна строиться методом компоновки из модулей технологического процесса (МТИ) в соответствии с изготавливаемыми на операции МП, МПИ.

Разработка непосредственно модульного технологического процесса, как и традиционного единичного процесса, после анализа исходных данных и технологичности конструкции детали, выбора организационной формы процесса и метода получения заготовки, включает разработку маршрутного технологического процесса, его операций и оформление технологической документации, однако содержание перечисленных этапов имеет существенные отличия.

2.3.5.1. Общие положения по выбору технологических баз

Выбор технологических баз является одной из важнейших задач разработки технологического процесса, оказывающих большое влияние на его качество. Характерная особенность *комплекта технологических*

баз (модуля технологических баз – МТБ), в отличие от комплекта конструкторских, состоит в том, что он предназначен лишь всегда заготовку всех степеней свободы.

В общем случае в качестве технологических баз могут выступать как любые поверхности детали или заготовки, так и элементы их симметрии (точка, центр, ось, плоскость). Их выбор определяется решаемой задачей.

Часто в одном МТБ сочетаются реальные поверхности и элементы симметрии. Например, базирование диска в самоцентрирующем трехлачковом патроне осуществляется торцом и центром симметрии диска.

Следует отметить, что в технологическом процессе изготовления детали, как правило, первые МТБ содержат поверхности заготовки и элементы их симметрии, а в дальнейшем по мере формирования на заготовке поверхностей детали появляются МТБ, образованные поверхностями детали и элементами их симметрии.

При построении технологического процесса сначала выбирают МТБ для получения каждого МП, МПИ детали. Исходными данными для решения этой задачи служит граф размерных связей МП, МПИ детали, из которого видно, какие МП, МПИ являются конструкторскими базами; на лучах указаны допуски координирующих размеров, показывающие уровень точности положения МП и МПИ.

Как известно, наивысшая точность относительного положения МП, МПИ теоретически должна получаться при совмещении конструкторских баз с технологическими базами, т.е. используется принцип совмещения баз. Если таким образом строить технологический процесс, то придется многократно менять МТБ. Допустим, если деталь имеет десять конструкторских баз, то при ее изготовлении придется 10 раз переустанавливать заготовку, что приведет не только к увеличению числа установок, но и числа операций; поэтому, при выборе МТБ стремятся использовать принцип единства баз.

Если при выборе МТБ в его состав входят поверхности детали, принадлежащие разным МП, МПИ, то существенно усложняются размерные связи технологического процесса. Поэтому рекомендуется в качестве МТБ выбирать только МП и МПИ детали. Если в качестве МТБ выбирается какой-либо МПИ, то в качестве баз желательно использовать те поверхности, которые составляют один из МП, входящих в его состав.

При использовании принципа единства баз сначала ведется поиск одного МТБ, относительно которого можно получить все МП, МПИ.

На поиск единого МТБ влияют следующие факторы: 1) количество МП и МПИ, заданных от одного комплекта конструкторских баз; 2) уро-

вень точности положения МП, МПИ относительно комплекта конструкторских баз; 3) возможность изготовления всех МП, МПИ детали.

Итак, выбор единого МТБ начинается с анализа конструкторских размерных связей МП, МПИ, на основе которого проводится поиск у детали такого МП или МПИ, относительно которого можно обработать все или большинство МП, МПИ.

Поиск МТБ рекомендуется проводить в следующей последовательности. Сначала составляют список модулей поверхностей (МП, МПИ), претендующих на роль единых технологических баз. В него включают прежде всего МП, МПИ, выполняющие роль конструкторских баз. Вошедшие в этот список модули поверхностей оцениваются по числу заданных относительно них МП, МПИ, уровню точности их относительно положения. В итоге в качестве МТБ выбирается тот МП или МПИ, относительно которого задано большее число модулей с наиболее высокими требованиями к точности их относительного положения.

Далее оценивается возможность обработки всех МП, МПИ относительно выбранного в качестве МТБ. Если среди них окажутся МП, МПИ, которые не могут быть изготовлены, например, из-за невозможности доступа к ним, или к ним предъявляются высокие требования к точности относительного положения, которые не могут быть достигнуты из-за смены баз или по другим причинам, то для них таким же способом выбирают в качестве МТБ другие МП или МПИ.

Пусть, к примеру, имеется некоторая деталь с определенным составом МП и их размерными связями. Согласно этим связям запишем слева все модули, являющиеся конструкторской базой (МПБ), а справа модули, заданные относительно соответствующей конструкторской базы.

Таблица 2.3.1

МПБ	МП	МПБ	МП
1	2, 5, 8, 11	18	22, 20, 16, 21
2	3, 4	6	10
8	7, 15, 18, 21	20	14, 9
3	19, 22	14	12
7	6	9	13, 17

Анализ размерных связей графа МП, МПИ показывает, что есть два модуля 1 и 8, относительно которых задано наибольшее число МП, МПИ – по четыре. Исходя из этого, в качестве МТБ для полного изготовления детали следует принять один из них. Для этого надо сопоставить уровни точности относительного положения МП, МПИ и выбрать тот, относительно которого задано большее число МП, МПИ с наибольшей точностью. Пусть таким МТБ будет модуль 1.

Теперь следует выяснить, можно ли от модуля 1 изготовить все МП, МПИ детали, т.е. есть ли доступ к изготовлению всех МП, МПИ. (Например, если заготовку корпусной детали базируют основанием, а на этом основании надо сделать несколько отверстий, то доступа к их изготовлению не будет).

Если окажется, что нельзя изготовить все МП, МПИ от модуля 1, то в качестве одного комплекта технологических баз следует рассматривать модуль 8. Его тоже следует оценить с точки зрения возможности изготовления всех МП, МПИ детали.

Если и от модуля 8 не удастся изготовить все модули, то надо рассматривать в качестве единого МТБ все оставшиеся модули, но в первую очередь модули, являющиеся конструкторской базой.

При отсутствии у детали модуля, относительно которого можно изготовит все МП, следует рассмотреть возможность создания специальных поверхностей, являющихся едиными технологическими базами (примером такого решения могут служить центровые гнезда для изготовления валов).

Если и такое решение невозможно или нецелесообразно, то придется для полного изготовления детали использовать несколько МТБ; при этом надо стремиться к минимальному числу МТБ.

После выбора всех МТБ надо оценить у каждого из них соответствие их поверхностей требованиям, предъявляемым к базам. Например, когда габаритные размеры установочной технологической базы малы, их искусственно увеличивают для сокращения погрешностей установки и повышения жесткости детали на время обработки. Например, для обработки поверхностей основных баз каретки револьверного суппорта станка (рис. 2.3.10, а) в качестве установочной технологической базы используют плоскость под револьверную головку (1, 2, 3 – опорные точки). Плоскость имеет небольшой диаметр, поэтому при установке по этой плоскости получается, во-первых, значительная погрешность установки, во-вторых, консольное расположение заготовки, в результате которого обработка сопровождается упругими деформациями заготовки и, как следствие, получение неправильной геометрической формы поверхностей.

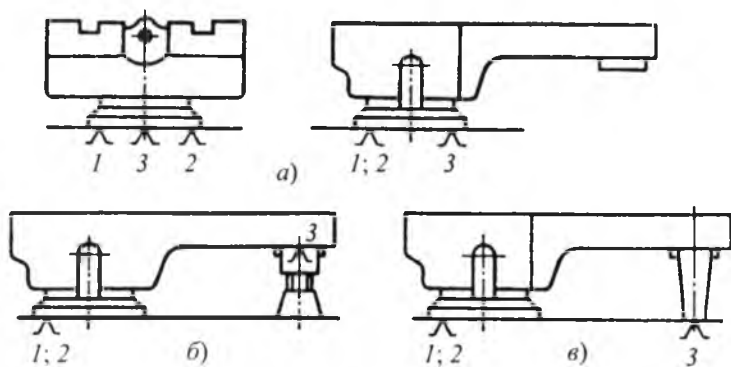


Рис. 2.3.10. Примеры увеличения габаритных размеров установочной базы

Введение клиньев, домкратов (рис. 2.3.10, б) для повышения жесткости требует значительных затрат времени на установку; кроме того, легко порождает значительные погрешности.

Хорошие результаты дает увеличение габаритных размеров технологической базы, достигаемое путем создания у заготовки специальных приливов (рис. 2.3.10, в), площадки которых совместно с плоской поверхностью, выполняя роль установочной технологической базы, позволяют не только повысить жесткость детали и сократить погрешность, но и уменьшить время установки. После окончания обработки приливы такого рода обычно удаляют.

При обработке некоторых деталей в качестве технологических баз на ряде операций используются сами обрабатываемые поверхности (например, при обработке гладких валиков на бесцентрово-шлифовальном станке, при обработке шариков и т.д.). В таких случаях одни участки поверхности используются в качестве технологических баз, в то время как другие в это время обрабатываются. Действительно, при обработке, например, на бесцентрово-шлифовальном станке гладкого валика часть его поверхности, соприкасающаяся в каждый данный момент с поверхностями ведущего круга и направляющего ножа, выполняет роль двойной направляющей технологической базы, в то время как другая часть подвергается обработке. Более строго следовало бы обе части поверхности в каждый данный момент рассматривать как две различные поверхности: одну – ранее образованную, другую – вновь образующуюся.

Изложенная выше методика выбора МТБ позволяет разработать алгоритм решения этой задачи на ЭВМ в диалоге с технологом. Опытный технолог с помощью графа МП, МПИ, чертежа детали и на основе опыта с помощью такого алгоритма может быстро оценить варианты МТБ и принять решение по их выбору.

Практика разработки технологических процессов показывает, что *с точки зрения выбора технологических баз все детали условно можно разделить на две группы.*

К первой группе относятся детали, к которым при их работе в изделии присоединяется не более одной детали или сборочной единицы. Характерным признаком деталей этой группы является наличие у них по одному полному или неполному комплекту основных и вспомогательных баз. В качестве примера можно указать такие детали, как рычаги, простейшие конструкции зубчатых колес, рукояток, валиков, кронштейнов, крышек, шкивов и ряд других.

Ко второй группе относятся детали более сложной конструкции, к которым при их работе в изделии присоединяется обычно не менее двух деталей или сборочных единиц. Характерной особенностью этой группы деталей является наличие у них, кроме одного комплекта основных баз, нескольких полных или неполных комплектов вспомогательных баз.

Выбор технологических баз у деталей первой группы относительно прост. В первую очередь следует выбирать поверхности, отличающиеся наибольшими габаритными размерами, протяженностью и наименьшими размерами, для их использования соответственно в качестве установочной, направляющей и опорной технологических баз. При этом не имеет значения, принадлежат ли эти поверхности основным или вспомогательным базам или выполняют роль рабочих.

На второй операции в качестве технологических баз необходимо использовать поверхности, полученные в результате обработки заготовки (детали) на первой операции.

На всех последующих операциях в качестве технологических баз следует использовать поверхности, полученные в результате обработки на второй операции (т.е. которые в необработанном виде использовались в качестве технологических баз на первой операции).

Прежде чем выбрать МТБ для деталей второй группы, необходимо изучить служебное назначение детали в изделии и установить размерные связи между всеми поверхностями детали, обратив в первую очередь внимание на связи, определяющие относительные повороты поверхностей.

После этого, в первую очередь, необходимо выбрать технологические базы для обеспечения точности относительных поворотов поверхностей и затем (или одновременно) технологические базы для обеспечения точности размеров, связывающих поверхности.

Если большинство МП, МПИ у деталей второй группы заданы относительно основных баз детали, то, как правило, последние следует выбирать в качестве первого МТБ. После этого изготавливают основные базы, а в дальнейшем от них изготавливают остальные МП и МПИ.

2.3.5.2. Разработка маршрута технологического процесса

Технологический маршрут определяет последовательность операций и состав технологического оборудования. От того, как построен технологический маршрут, во многом зависят качество детали и эффективность ее изготовления.

Разработка маршрутного технологического процесса является сложной задачей и зависит от конструкции детали, материала, требований к ее качеству, вида заготовки, масштаба выпуска.

При традиционном проектировании маршрута технологического процесса остаются неизвестными величины снимаемых припусков, число рабочих ходов при обработке каждой поверхности детали, режимы обработки, затраты времени. Таким образом, маршрут не дает информации, которая позволила бы на этом этапе проектирования подсчитывать производительность и себестоимость изготовления детали. Вследствие указанного недостатка оценить эффективность технологического процесса становится возможным лишь после проектирования операций, т.е. после полной разработки процесса. Это существенно удлинит поиск оптимального варианта разрабатываемого технологического процесса и увеличивает трудоемкость проектирования. В то же время установленная маршрутом структура процесса: число и последовательность операций, методы обработки и оборудование – оказывают существенное влияние на стоимость, производительность и, в конечном итоге, на эффективность изготовления детали.

Другим недостатком существующей методики проектирования технологического процесса является отсутствие строгих правил по выбору последовательности обработки поверхностей детали, выбору технологических баз, объединения технологических переходов в операции.

Перечисленные недостатки в значительной степени снижаются при использовании модульного принципа в построении технологического

процесса. В этом случае технологический процесс komponуется из МТИ изготовления модулей поверхностей детали. При этом предполагается, что есть банк предварительно разработанных МТИ и варианты МТБ. Типовые МТИ включают величины снимаемых припусков, режимы рабочих ходов, конкретные модели станков, что позволяет иметь достаточно точную оценку затрат времени на обработку МП или МПИ. Таким образом, появляется возможность в первом приближении количественно оценивать по разработанному маршруту ожидаемые себестоимость и производительность процесса изготовления детали.

Разработка маршрута включает: 1) выбор технологических баз и последовательности изготовления МП, МПИ детали; 2) определение заготовительных модулей и технологических переходов; 3) разработку последовательности обработки заготовки; 4) формирование операций.

Определение последовательности изготовления МП, МПИ детали и выбор технологических баз. Это две взаимосвязанные задачи, от решения которых во многом зависит получение заданного качества детали и эффективность процесса ее изготовления.

Наиболее эффективным изготовление детали будет при использовании принципа единства баз, когда от одного комплекта технологических баз (модуля технологических баз МТБ) получают все МП, МПИ детали. Его применение исключает переустановку заготовки, повышая тем самым точность обработки и позволяя воспользоваться одинаковыми приспособлениями на всех операциях технологического процесса. Однако редко удастся всю обработку заготовки производить с одной установки от одного МТБ, и тогда приходится выбирать несколько МТБ.

Разработка маршрута начинается с определения последовательности изготовления МП, МПИ детали. При выборе последовательности изготовления МП, МПИ детали решают задачи достижения заданного качества и высокой производительности обработки.

На выбор последовательности изготовления МП, МПИ наибольшее влияние оказывают конструкция и требования к качеству детали, конструкция ее заготовки, а также необходимость смены МТБ, удобство и эффективность изготовления.

В первую очередь следует изготавливать те поверхности, на которых могут обнаружиться литейные пороки (раковины, пустоты), чтобы не затрачивать бесполезно труд на обработку других поверхностей из-за возможного брака детали по дефектам литья. Последовательность изготовления МП, МПИ может быть обусловлена также стремлением обеспечить возможно меньшее число перестановок заготовки по ходу технологического процесса.

Необходимость в смене МТБ и их последовательности уже в значительной степени определяет последовательность изготовления МП, МПИ, поскольку они закреплены за соответствующими МТБ.

На последовательность изготовления МП, МПИ существенное влияние оказывает конструкция детали. Например, корпусная деталь имеет несколько сторон, на которых, как правило, располагаются группы МП, МПИ. В таких случаях изготавливают МП, МПИ по группам, расположенным на разных сторонах.

У деталей типа тел вращения часто наблюдается концентричное расположение МП, МПИ, что тоже определяет последовательность их изготовления.

Результаты выбора МТБ и ориентировочной последовательности изготовления МП, МПИ детали записываются в виде схемы. Пусть, к примеру, некоторая деталь содержит модули 1МПИ, 2МПИ, 3МП, 4МПИ – 7МПИ и др. Тогда к примеру схема примет вид:

1МТБ	1МТБ	1МТБ	2МТБ	2МТБ	
1МПИ	3МП	7МПИ	2МПИ	4МПИ	и т.д.,

из которой видно, в какой последовательности и от каких технологических баз должны изготавливаться все МП, МПИ детали.

Выбор технологических баз на первой операции. Чтобы приступить к обработке заготовки в соответствии с приведенной выше схемой, базируют заготовку по 1МТБ. Однако 1МТБ и все остальные МТБ являются поверхностями детали, а не поверхностями заготовки, и поэтому перед началом обработки не существуют.

Поэтому, прежде чем изготавливать МП, МПИ детали надо подготовить 1МТБ, базируя заготовку по ОМТБ. Выбор ОМТБ (комплект технологических баз на первой операции) оказывает большое влияние на эффективность технологического процесса.

Построение технологического процесса должно начинаться с выбора ОМТБ на первой операции по подготовке первого комплекта баз (1МТБ). Первая операция оказывает большое влияние на эффективность технологического процесса, так как решаются две важные задачи: 1) установление связей, определяющих положение МП, МПИ, получающихся после обработки, относительно МП, МПИ, остающихся необработанными; 2) распределение фактически припусков между МП, МПИ, подлежащих обработке.

Правильное решение обеих задач оказывает влияние на количество переходов и операций технологического процесса, его трудоемкость, цикл и себестоимость обработки.

При решении первой задачи обычно руководствуются необходимостью обеспечить выполнение детали ее служебного назначения при работе в изделии. У ряда деталей их рабочие поверхности (МПР), ввиду сложности формы, часто получают уже при изготовлении заготовки и далее не обрабатываются, в то время как поверхности МПБ, как правило, обрабатываются. Если у таких деталей в результате обработки не будут обеспечены с требуемой точностью положение необрабатываемых МПР относительно соответствующих МПБ, детали не смогут правильно выполнять свое служебное назначение.



Рис. 2.3.11. Лопатка направляющего аппарата гидротурбины

Примером (рис. 2.3.11) могут служить лопатки направляющего аппарата гидротурбины, у которых наружная обтекаемая поверхность (перо), выполняющая функцию рабочей поверхности лопатки, обычно только зачищается шлифовальным кругом для получения требуемой шероховатости, обеспечивающей уменьшение гидравлических потерь при обтекании лопаток направляющего аппарата водой. Если в результате обработки не будет установлена требуемая точность расстояний и относительных поворотов между рабочими поверхностями лопаток и их основными базами (МПБ) – поверхностями цапф и торцов, лопатки направляющего аппарата не будут правильно работать. Поэтому при зацентровке цапф лопаток в качестве технологических баз необходимо выбирать рабочую поверхность (МПР) ("перо") лопатки.

У некоторых деталей необходимость установления рассматриваемых связей вызывается требованиями:

- 1) получения равномерности толщины стенки детали с целью обеспечения требуемой прочности или динамической уравновешенности детали (например при изготовлении пустотелых лопаток газовых двигателей, гидравлических цилиндров, блоков автомобильных двигателей и т.д.);
- 2) обеспечения необходимого зазора между свободными и другими поверхностями двух деталей, располагающихся или перемещающихся на небольшом расстоянии одна от другой при работе в машине.

При решении второй задачи (распределение припуска) на первой операции руководствуются тремя основными положениями: 1) необходимостью сохранения плотного однородного слоя материала на поверхностях детали, подвергающихся при ее работе в изделии наиболее интенсивному изнашиванию; 2) необходимостью равномерного распределения

припуска на обработку на каждой отдельной поверхности и, в первую очередь, на охватывающих (внутренних) поверхностях (пазов, литых отверстий и т.п.); 3) необходимостью увеличения производительности обработки путем сокращения объема материала, подлежащего удалению в процессе обработки.

Например, при базировании станины токарного станка по первому варианту (рис. 2.3.12, а) погрешности литой заготовки вызовут неравномерный припуск при обработке направляющих станины на операции 1. Это приведет к неравномерному качеству поверхностного слоя по длине направляющих и сравнительно быстрой потере их геометрической точности вследствие неравномерного изнашивания по длине. Чтобы устранить этот недостаток, станины обычно отливают направляющими вниз, с целью получения на них наиболее плотного и однородного слоя материала, а обработку станины ведут по второму варианту.

При базировании станины на операции 1 по второму варианту (по направляющим) (рис. 2.3.12, б) погрешности заготовки вызовут неравномерность припуска на ножках станины, что не имеет большого значения, так как повышенные требования предъявляются к качеству поверхностного слоя направляющих. На операции 2 станину базируют по ножкам и с направляющих снимают равномерный слой материала, обеспечивая его однородность по всей длине.

К обеспечению равномерного распределения припуска стремятся и при обработке охватывающих поверхностей – отверстий, пазов. Это объясняется в первую очередь тем, что для их обработки обычно применяется

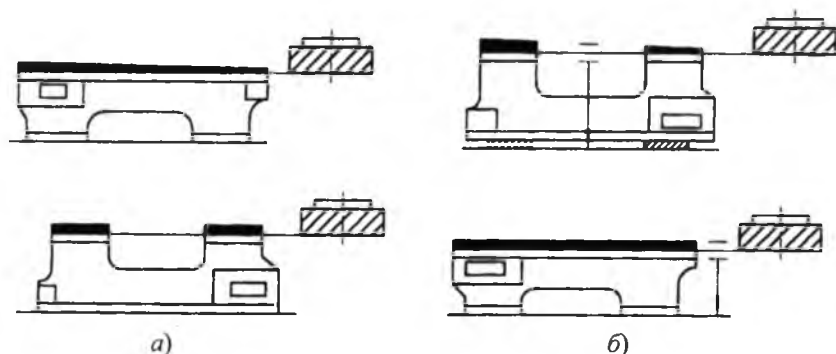


Рис. 2.3.12. Схема последовательности обработки станины токарного станка на первых операциях:
а, б – первый и второй варианты соответственно

консольный инструмент (оправки, расточные скалки и т.п.), отличающийся низкой жесткостью из-за того, что размеры отверстий и пазов лимитируют их габаритные размеры.

Низкая жесткость инструмента вынуждает снижать режимы обработки, увеличивать число рабочих ходов. Поэтому неравномерность снимаемого припуска приводит к существенному снижению производительности обработки.

Равномерность припуска на поверхностях деталей позволяет: 1) повысить точность обработки на первых операциях и тем самым сократить количество рабочих ходов и переходов; 2) сократить расходы на электроэнергию и амортизацию оборудования, так как можно использовать станки с меньшей мощностью электродвигателя; 3) увеличить производительность обработки на последующих операциях.

При распределении припуска на обработку между несколькими поверхностями, особенно параллельными, следует наибольшую его часть снимать с менее ответственных поверхностей, имеющих, по возможности, и меньшие габаритные размеры. В соответствии с этим, например, при обработке станины токарного станка, показанной на рис. 2.3.12, целесообразно наибольшую часть припуска снимать с поверхностей ножек, отвечающих указанным признакам.

При наличии в заготовке нескольких охватывающих поверхностей равномерность припуска можно достичь только у одной из них. При правильном выборе технологических баз можно в некоторой степени снизить неравномерность припуска и у некоторых из них.

В качестве такого примера на рис. 2.3.13, *а* показан эскиз заготовки корпусной детали, содержащей три отверстия. Там же приведены три варианта базирования заготовки для подготовки технологических баз (основание и два отверстия), относительно которых будут обработаны все отверстия.

По первой схеме базирования (рис. 2.3.13, *б*) будет иметь место неравномерность припуска во всех трех отверстиях из-за больших погрешностей у заготовки координирующих размеров осей отверстий и погрешностей их формы. При втором варианте базирования (рис. 2.3.13, *в*) будет достигнута наилучшая равномерность припуска в отверстии *I*, некоторое выравнивание припуска в отверстии *II* и полностью сохранится неравномерность припуска в отверстии *III*. При третьем варианте базирования (рис. 2.3.13, *г*) наилучшая равномерность припуска будет во *II* отверстии, некоторое выравнивание припуска будет в отверстии *I* и уменьшится неравномерность припуска в отверстии *III*.

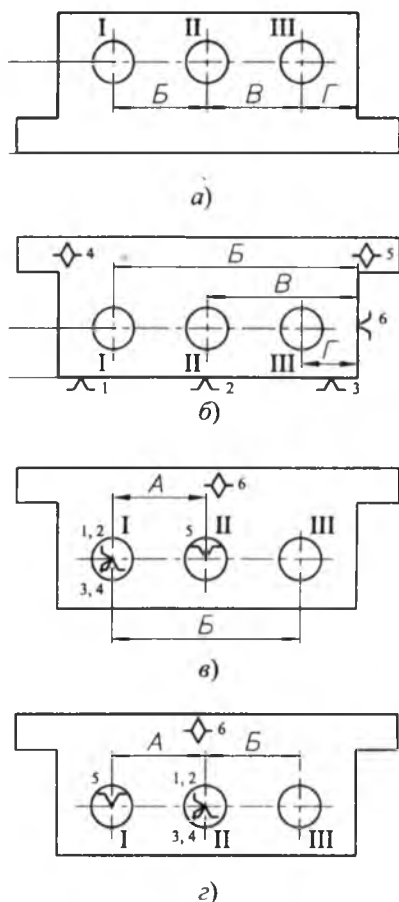


Рис. 2.3.13. Варианты базирования заготовки корпусной детали на первой операции:

а – деталь; *б* – базирование по плоскостям; *в* – базирование по двойной направляющей базе отверстия I и двум опорным базам; *г* – базирование по двойной направляющей отверстия II и двум опорным базам

Все перечисленные выше задачи решаются на первой операции путем правильного выбора технологических баз. Выбор технологических баз на первой операции можно рассматривать как процесс "выкраивания" или "разметки" будущей готовой детали из ее заготовки. При небольших масштабах выпуска изделий технологические базы выбирают и материализуют в виде рисок и накернивания при помощи ручной разметки. Пользуясь такими "разметочными" технологическими базами, рабочий определяет положение заготовки на столе станка или рабочем месте.

При увеличении масштаба выпуска ручную разметку заменяют механизированной, осуществляемой с помощью приспособления, упрощающего определение положения обрабатываемого объекта на станке и его фиксацию путем закрепления. Поэтому вопросу правильной разработки конструкции приспособлений для первой операции необходимо уделять должное внимание.

К сожалению, не всегда придается важное значение первой операции, и она рассматривается как операция второстепенная, не заслуживающая должного внимания. Это приводит, с одной стороны, к серьезным ошибкам в выборе схемы

базирования заготовки на первой операции, а с другой, – к введению в технологический процесс дополнительных операций, необходимых для исправления допущенных ошибок.

После выбора МТБ на первой операции, который обозначается как 0МТБ, уточняется последовательность получения МП, МПИ детали путем ввода этапа получения 1МТБ.

В итоге последовательность получения МП, МПИ приобретает вид:

0МТБ 1МТБ 1МТБ 1МТБ 2МТБ 2МТБ
1МТБ – 1МПИ – 3МП – 7МПИ – 2МП – 4МПИ и т.д.

Эта последовательность может существенно отличаться от первой, так как от 0МТБ может оказаться целесообразным изготовить и ряд других модулей поверхностей; может измениться и последовательность изготовления других МП, МПИ из-за выбора 0МТБ.

Определение заготовительных модулей и количества технологических переходов для получения каждого МП, МПИ. После определения ориентировочной последовательности изготовления МП, МПИ детали следует определить технологические переходы по изготовлению каждого МП, МПИ и их заготовительные модули. Для этого надо установить величины припусков, которые необходимо снять для получения каждого МП, МПИ. С этой целью надо после выбора 0МТБ на первой операции в контур заготовки вписать контур детали. Тогда разница между ними и будет припуском на изготовление детали, из которого формируются заготовительные модули МПз, МПИз.

Чертеж заготовительного модуля поверхностей (МПз, МПИз) отличается от чертежа его МП, МПИ детали величинами припуска, который должен сниматься с каждой его поверхности одним рабочим ходом инструмента (рис. 2.3.14). Поэтому, чтобы определить МПз, МПИз, надо рассчитать по известной методике величины припусков на каждую поверхность каждого МП, МПИ детали.

МП и МПИ, составляющие деталь, как правило, существенно отличаются друг от друга конструкцией, требованиями к качеству, а потому для их получения потребуются снимать разные величины припусков и тогда разными будут МПз, МПИз. На практике получить заготовку, с которой в одних местах снимается припуск величиной в десятые доли миллиметра, а в других – величиной в несколько миллиметров, как

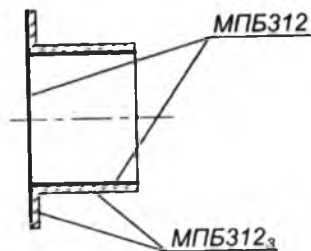


Рис. 2.3.14. Заготовительный модуль модуля Б312

правило, не представляется возможным или из-за отсутствия соответствующих методов изготовления заготовки, или по экономическим соображениям. Поэтому, обычно фактическая заготовка существенно отличается от той, которая предполагает, что каждый МП, МПИ детали получается путем обработки одного заготовительного модуля поверхностей.

Как правило, многие МП, МПИ получаются в результате многократных обработок. Это означает, что для получения

на детали каждого МП или МПИ потребуется обработать несколько МПз или МПИз. Таким образом, в зависимости от конструкции детали, ее МП, МПИ, конструкции заготовки, требований к качеству и др. каждая поверхность МП, МПИ может быть получена за один или в несколько технологических переходов, а потому и с помощью одного или нескольких МТИ.

Разработка МТИ включает определение состава технологических переходов, режимов обработки, последовательности и количества переходов по изготовлению поверхностей МП, МПИ.

Итак, МТИ предусматривает обработку каждой поверхности МП, МПИ только за один рабочий ход. Поэтому, если общий припуск, снимаемый с любой поверхности МП, МПИ, окажется больше величины припуска, подлежащего съему для получения заданного качества поверхности, то такой МП, МПИ потребует нескольких МТИ. Таким образом, зная величины припусков, по каждому МП, МПИ при заданной заготовке можно определить конструкции и число МПз, МПИз по каждому МП, МПИ детали.

Опытный технолог может приблизительно оценить конструкции и количество МПз, МПИз по каждому МП, МПИ детали, но для сведения к минимуму влияния субъективного фактора на разработку маршрута технологического процесса желательно иметь банк МТИ.

Разработка МТИ начинается с выбора методов обработки каждой поверхности МП, МПИ при заданном качестве, припусках, материала заготовки и масштаба выпуска. При выборе методов обработки следует обеспечивать заданные показатели качества: качество поверхностного

слоя; шероховатость поверхности; точность формы поверхности; точность размера поверхности.

Из всех методов обработки, которые обеспечивают получение заданного качества по всем показателям, следует выбирать тот, который позволяет получить наивысшую производительность с наименьшей себестоимостью.

Выбранный метод обработки должен обеспечить заданное качество МП, МПИ детали при определенных режимах обработки, в состав которых входит и величина снимаемого припуска, что позволяет определить заготовительные МПз, МПИз. Разрабатывая маршрут технологического процесса, надо помнить важную особенность модульного технологического процесса: все поверхности одного МП, МПИ должны изготавливаться на одной операции.

При традиционном проектировании технологических процессов часто получается так, что поверхности, входящие в один МП, МПИ, обрабатываются на разных операциях и от разных технологических баз или в разной последовательности. Например, в условиях единичного и мелкосерийного производств, когда стремятся полностью изготовить деталь на одном-двух станках, каждая поверхность обрабатывается предназначенным для нее инструментом, причем обработка поверхностей одного МП чаще всего производится не друг за другом, а после обработки ряда других поверхностей. Это приводит к накоплению погрешностей обработки относительного положения поверхностей одного МП. В условиях крупносерийного и массового производств часто поверхности одного МП обрабатываются на разных операциях, что тоже приводит к накоплению погрешностей обработки относительного положения поверхностей. Если накопленная погрешность относительного положения поверхностей становится выше допустимой, то для ее устранения в конце технологического процесса вводится дополнительная операция, где одна или несколько из поверхностей МП или МПИ обрабатываются, а другие принимаются за технологические базы.

Изготовление всех поверхностей одного модуля на одной операции, за один установ позволяет избежать накопления погрешностей их относительного положения, а также повысить точность относительного положения самого МП, МПИ, так как за один установ обеспечивается точность всех его координирующих размеров. Если при этом обработка всех поверхностей МП, МПИ осуществляется многоинструментной наладкой, то сократится и число настроек технологической системы. Кроме того, в этом случае упрощаются размерные связи технологического процесса,

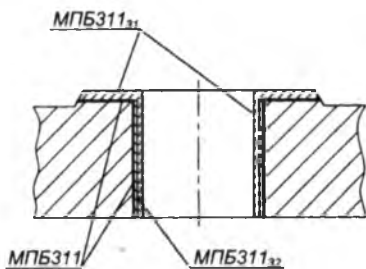


Рис. 2.3.15. Заготовительные модули Б311

что делает их в значительной степени прозрачными и обозримыми, и позволяет легко оценить влияние изменения последовательности обработки МП, МПИ на погрешность обработки.

Итак, имея банк МТИ, зная припуски, подлежащие съему с каждой поверхности каждого МП, МПИ при заданной заготовке, устанавливают количество МПз, МПИз по каждому МП, МПИ.

Если банк МТИ отсутствует, то технолог устанавливает количество МПз, МПИз по каждому МП, МПИ детали, путем определения необходимого числа технологических переходов на каждой поверхности каждого МП, МПИ. При этом в одних случаях конструкция заготовительного модуля может полностью повторять конструкцию МП, МПИ детали, а в других случаях будет отличаться и даже может перейти в другой вид МП, МПИ.

Рассмотрим несколько примеров определения заготовительных модулей. На рис. 2.3.15 показана стенка корпусной детали, в которой нужно получить модуль Б311, состоящий из торца и отверстия.

Пусть требования к точности торца ниже требований к точности отверстия. Тогда общий припуск с торца будет снят в соответствии с требованиями к точности, например, за один технологический переход, а с отверстия – за два технологических перехода.

На заготовке под изготовление модуля Б311 имеется заготовительный модуль Б311з₁, полностью повторяющий конструкцию модуля Б311. После его обработки на заготовке получим второй заготовительный модуль Б311з₂, но содержащий только отверстие, и более близкий по своим размерным и качественным характеристикам к модулю Б311 детали. После обработки второго заготовительного модуля Б311з₂ окончательно получим модуль Б311.

Таким образом, модуль Б311з₂ конструктивно отличается от модуля Б311, так как содержит только одно отверстие. Отсюда последовательность обработки заготовительных модулей для получения МПБ311 выглядит следующим образом:

$B311z_1 \rightarrow B311z_2 \rightarrow B311$.

Рассмотрим другой пример. Пусть требуется изготовить в стенке корпуса модуль B211 (рис. 2.3.16), представляющий собой сочетание торца с резьбовым отверстием.

Поскольку для нарезания резьбы необходимо иметь в корпусе отверстие, то заготовительный модуль перед получением B211 будет B311z₁. С учетом этого технология изготовления модуля B211 включает сначала изготовление B311z₂ из B311z₁.

Поскольку отверстие в заготовке отсутствует, то первым заготовительным модулем будет B311z₁ с торцом и отверстием с диаметральной размером $d = 0$.

После обработки B311z₁ получим второй заготовительный модуль B311z₂. Если принять средний уровень точности изготавливаемого B211, то торец достаточно обработать еще один раз.

Таким образом, после обработки B311z₂ будет окончательно получен торец модуля B211, а третий заготовительный модуль B311z₃ будет представлять собой только отверстие под нарезку резьбы. После обработки модуля B311z₃ получим модуль B211 детали.

Из изложенного видно, что под изготовление модуля B211 его заготовительные модули имеют другую конструкцию.

Итак, после определения МПз, МПИз для получения каждого МП, МПИ детали будет определена последовательность обработки заготовки:

1МПИ	–	3МП	–	7МПИ	–	2МП	–	4МПИ	–	и т.д.
МПИз ₂		3МПз ₁		7МПИз ₃		2МПз ₂		4МПИз ₂		
1МПИз ₁				7МПИз ₂		2МПз ₁		4МПИз ₁		
				7МПИз ₁						

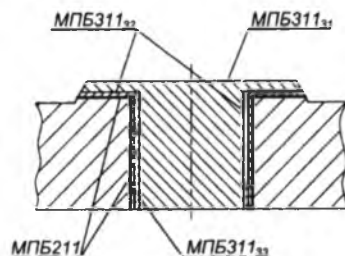


Рис. 2.3.16. Заготовительные модули B211

Определение маршрута обработки заготовки и формирование операций. Задача состоит в том, чтобы установить последовательность

всех МТИ по обработке заготовительных модулей для получения всех МП, МПИ детали. Отметим, что технологический процесс содержит не только МТИ обработки МПз, МПИз, но и технологические переходы, связанные с подготовкой технологических баз и термообработкой.

Гриняв за основу выбранную последовательность изготовления всех МП, МПИ, на следующем этапе в разработке маршрута технологического процесса определяют маршрут обработки заготовки. Она включает обработку заготовительных модулей, подготовку технологических баз, разделение обработки на предварительную и окончательную, включение термообработки, если она предусматривается.

Разделение обработки заготовки на предварительную и окончательную в первую очередь касается изготовления МП, МПИ, отличающихся высокими требованиями к качеству поверхностей и геометрической точности. Это означает, что если для получения МП, МПИ детали надо обработать три или четыре МПИз, то осуществлять это на одной операции, как правило, не рекомендуется.

Если необходима термообработка, то, во-первых, ее надо включать на соответствующем этапе обработки заготовки и, во-вторых, это приводит, как правило, к необходимости в последующей дополнительной операции связанной с устранением погрешностей, которые обусловлены собственными деформациями заготовки, возникшими в результате термообработки. В первую очередь приходится исправлять МТБ, которые уже использовались и будут использоваться в дальнейшем.

С учетом указанных факторов уточняется последовательность обработки заготовки, включающая обработку всех МПз и МПИз. Тогда маршрут обработки заготовки примет следующий вид:

①	②	③	④	⑤	⑥		
0МТБ	1МТБ	1МТБ	1МТБ	1МТБ	1МТБ		
1МТБз	1МПИз ₁	1МПИз ₁	3МПз ₁	7МПИз ₁	7МПИз ₂		
1МТБ	1МПИз ₂	<u>1МПИ</u>	<u>3МП</u>	7МПИз ₂	7МПИз ₃		
⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
2МТБ3МП)	2МТБ	термообра- ботка	3МТБ	2'МТБ	2'МТБ	2'МТБ	
2МТз ₁	4МПИз ₁		2МТБ	2МПз ₂	4МПз ₂	7МПИз ₃	
2МТз ₂	4МПИз ₂		2'МТБ	<u>2МП</u>	<u>4МП</u>	<u>7МПИ</u>	и т.д.,

где в рамке указывается окончательно полученный МП или МПИ детали в результате обработки заготовки.

Как следует из приведенной схемы последовательности обработки заготовки до получения готовой детали, каждая позиция состоит из трех уровней. На верхнем уровне указан модуль технологических баз, на втором уровне – заготовительный модуль поверхностей, подлежащий обработке, на третьем уровне – модуль поверхностей, который получается в результате обработки, который может быть или следующим заготовительным модулем, или готовым модулем поверхностей детали.

Как следует из схемы, на первой позиции подготавливается комплект технологических баз 1МТБ, заготовительным модулем которого являются поверхности заготовки, а технологическими базами – 0МТБ. На второй и третьей позициях подвергаются обработке два заготовительных модуля 1МПИ₂, 1МПИ₁ от 1МТБ, на четвертой, пятой и шестой позициях от того же комплекта баз обрабатываются заготовительные модули 3МП и 7МПИ, при этом на позициях третьей и четвертой окончательно получают 1МПИ и 3МП детали (выделено рамками). Далее на седьмой и восьмой позициях обрабатываются заготовительные модули 2МП и 4МПИ от 2МТБ, в качестве которого используется полученный на четвертой позиции 3МП.

Затем следует операция термической обработки, после которой на десятой позиции вторично обрабатывается комплект технологических баз 2МТБ, являющийся в данном случае заготовительным; это делается для устранения погрешностей 2МТБ, возникших в результате термической обработки заготовки. После обработки 2МТБ получают комплект технологических баз – 2МТБ. От него на позициях 11, 12 и 13 окончательно получают модули 2МП, 4МП и 7МПИ.

На практике возможны разные варианты последовательности изготовления одной и той же детали. Эта многовариантность является результатом влияния большого числа факторов на эффективность изготовления детали таких, как размер серии, наличие технологического оборудования, разнообразие режущего инструмента, удобство установки заготовки, организационные факторы и др.

Определение последовательности обработки заготовки носит в значительной степени творческий характер: технолог должен выбрать такой вариант, чтобы, с одной стороны, можно было наиболее эффективно снять весь припуск при заданном качестве, а с другой стороны, – максимально использовать имеющиеся технологические средства при мини-

мальной необходимости создания новых, но при обязательном соблюдении принципов построения модульных технологических процессов.

На основании полученного маршрута обработки заготовки МТИ объединяют в операции и таким образом получают маршрут модульного технологического процесса.

Отличием построения маршрута модульного технологического процесса является формирование операций из одного или нескольких МТИ под изготовление МП, МПИ, а не отдельных поверхностей. На одной операции может обрабатываться один или несколько МПз, МПИз одного или нескольких наименований МП, МПИ с помощью соответствующих МТИ. На объединение модулей поверхностей, изготавливаемых на одной операции, важное влияние оказывают: требования к качеству и производительности обработки, методы обработки, тип производства, масса и габариты заготовки, ее конструктивные особенности, технологические и технические характеристики станка. Разные требования к качеству МП, МПИ требуют разных методов их обработки, МТИ, а в ряде случаев и разных станков; все это приводит к разным операциям.

Большое влияние на формирование операций оказывают требования к точности обработки и, в первую очередь, требования к точности относительного положения МП, МПИ. Высокие требования к точности размеров, формы, шероховатости поверхностей МП, МПИ требуют высокоточного оборудования и выделение их МТИ в отдельные операции.

Высокие требования к точности относительного положения, например, двух модулей поверхностей, требуют оценки погрешности установки заготовки на технологической системе. Если погрешность установки окажется больше заданной точности относительного положения модулей, то надо в операцию включить изготовление обоих модулей.

На формирование операций оказывают влияние масса и габариты детали. Крупные детали с большой массой целесообразно обрабатывать с минимумом перестановок, поэтому маршрут должен быть коротким, иначе будут необоснованно высокими затраты времени и труда на передачу заготовки от станка к станку, увеличится влияние погрешности установки на точность обработки. Обработка деталей небольших размеров характеризуется малыми затратами времени, поэтому при разработке маршрута следует стремиться тоже к меньшему числу операций, так как затраты времени на передачу заготовки от станка к станку могут превышать время обработки заготовки на станке. Однако следует помнить, что с уменьшением числа операций снижается уровень специализации рабочих мест.

На формирование операций оказывает большое влияние вид производства. Формирование операций в условиях поточного производства должно быть подчинено получению затрат времени на каждую операцию, равных или кратных такту.

В массовом и крупносерийном производствах рекомендуется высокая концентрация технологических переходов на одной операции; это должно обеспечиваться за счет обработки на операции нескольких МПз, МПИз.

Существенное влияние на формирование операций оказывают условия, в которых выполняется технологический процесс. Если технологический процесс разрабатывается для действующего завода, при формировании операции учитывают имеющееся на заводе оборудование, перспективы модернизации оборудования. При разработке технологического процесса для нового завода задача формирования операции решается из условий применения современных средств.

На формирование операции оказывают влияние организация и система планирования производства, и ряд других факторов.

При формировании маршрута в единичном и мелкосерийном производстве желательно разрабатывать по несколько вариантов маршрута, сохранив содержание операций и изменяя только их последовательность. Эти варианты помогут впоследствии изменять в случае необходимости маршрут движения заготовки от одного рабочего места к другому, придавая процессу гибкость и обеспечивая его лучшие технико-экономические показатели.

Принимая во внимание изложенное и полученную схему обработки заготовки, МТИ объединяются в группы, образуя операции. При этом должно выполняться условие, что у каждого МТИ, включенного в группу, МТБ является общим. В итоге будет получен маршрут изготовления детали, из которого видно, – какие МП, МПИ изготавливаются на операциях, по каким МТИ, а также перечень и последовательность операций и тип оборудования для осуществления каждой операции.

2.3.5.3. Разработка технологической операции

Исходными данными для разработки операции являются изготавливаемые на операции МП, МПИ, их МТИ, а также МТБ, заготовительные модули, тип станка, такт выпуска, общее количество изготавливаемых деталей и др.

В результате разработки технологической операции должны быть выбраны модель станка, схема базирования заготовки, приспособление,

скорректированы режимы обработки и марки материала режущего инструмента, его тип и характеристики, определена последовательность обработки МПз, МПИз, выбраны контрольно-измерительные средства, вспомогательный инструмент, метод настройки и поднастройки на заданную точность, определены рабочие настроечные размеры и др.

При разработке операции надо проверить совместимость технологических переходов всех МТИ, уточнить режимы обработки и, в случае надобности, внести соответствующие коррективы.

В завершение на каждый МТИ заполняется карта, где приводятся эскиз изготавливаемого МП, МПИ с припусками на обработку каждой его поверхности, последовательность всех технологических и вспомогательных переходов, непосредственно связанных с получением поверхностей МП, МПИ, режимы обработки, основное технологическое и вспомогательное время на обработку, обрабатывающий инструмент и др.

Следующим этапом разработки операции является определение последовательности изготовления МП, МПИ. В зависимости от серийности производства возможны три варианта изготовления МП, МПИ: последовательная, параллельная и смешанная обработки их заготовительных модулей. Последовательная обработка обычно применяется в единичном и мелкосерийном производстве, а параллельная – в массовом и крупносерийном.

Критерием выбора последовательности изготовления МП, МПИ является достижение наивысшей производительности при заданной точности обработки.

Выбор модели станка. При разработке традиционных технологических процессов станки выбирают по методу обработки: фрезерные, сверлильные и т.д., или комбинации методов обработки.

При разработке модульных технологических процессов станки должны выбирать под изготовление МП, МПИ по заданному МТИ.

Поскольку приходится пользоваться традиционным станочным парком, то при выборе модели станка в первую очередь устанавливается возможность изготовления на нем МП, МПИ по заданным МТИ.

Выбирая станок, руководствуются следующими основными соображениями.

Соответствие рабочей зоны станка габаритным размерам заготовки. Заготовка должна свободно размещаться на станке, но использовать более крупный станок, чем это необходимо, нецелесообразно.

Например, токарную обработку деталей, имеющих большой диаметр, но малую длину, выгодно производить на лоботокарном или кару-

сельном станке, а не на обычном токарном. Сверлить отверстия в крупных деталях лучше на радиально-сверлильном станке, а не на вертикально-сверлильном. Растачивать отверстия в крупных деталях, имеющих форму, плохо вписывающуюся в воображаемый цилиндр, лучше на станках типа расточных, а не на станках, требующих вращения детали.

Возможность обеспечения нужной точности обработки. Это соображение приобретает особое значение при выборе станков для окончательных операций. При этом, зная нужную точность, ориентируются на величину так называемой *экономической точности* метода обработки, характерную для данного станка.

Понятие об экономической точности основывается на статистических исследованиях и связано с тем, что для каждого станка (более укрупненно – для каждого процесса или метода обработки) существует некоторый интервал точности обработки между точками 1 и 2 (см. рис. 2.3.17). Он характерен тем, что при выходе из него в сторону высшего уровня точности (до точки 1), стоимость обработки начинает быстро возрастать, а при выходе в сторону низшего уровня (после точки 2) она уменьшается очень медленно. Этот интервал между точками 1 и 2 определяет границы, в которых лежит некоторая средняя (экономическая) точность обработки для данного метода обработки и станка.

При выборе станков учитывают, что экономическая точность зависит не только от метода обработки, на который рассчитан станок (точение, шлифование и т.д.), но и от припуска на обработку и материала детали (например, при точении легких сплавов легко достигается такая же точность, какую при обработке сталей можно экономично получить только шлифованием). Поскольку величины снимаемых припусков фигурируют в МТИ, то можно точнее выбрать нужный станок.

При выборе станка учитывают также допустимую шероховатость поверхности. В пределах каждого метода обработки шероховатость зависит в значительной степени от режима обработки, но прежде всего определяется самим процессом.



Рис. 2.3.17. Зависимость себестоимости обработки от погрешности (точности) обработки

Соответствие мощности, жесткости и кинематических возможностей станка наивыгоднейшим режимам обработки. Станок должен быть достаточно мощным и жестким, чтобы он не ограничивал сечение снимаемой стружки (это особенно важно для предварительной обработки), а также жестким и быстроходным, чтобы не пришлось снижать скорость резания. Это особенно важно для окончательной обработки и учета современных тенденций по повышению скоростей обработки.

Соответствие производительности станка заданной программе выпуска деталей. В случае малой производительности станка для операции может потребоваться несколько станков; соответственно увеличивается число необходимых приспособлений и инструментов, количество рабочих, станки занимают большую площадь и т.д. В подобных случаях возникает задача о возможности применения особо высокопроизводительных приспособлений или специальных станков. С другой стороны, чрезмерно производительный станок не будет загружен. Применение станка повышенной производительности (многошпиндельного вместо одношпиндельного, полуавтомата и т.п.) всегда должно быть достаточно обосновано. Например, при более тщательной оценке можно обнаружить, что не менее экономично требуемая производительность достигается и на более простом станке, если его снабдить соответствующим приспособлением. В условиях серийного производства необходимо учитывать, что станки с повышенной производительностью менее универсальны, чем станки общего назначения, и потому их труднее догружать другими операциями.

Выбор инструментов. Выбирая обрабатывающие инструменты, ориентируются прежде всего на ГОСТы и заводские нормалы. В необходимых случаях предусматривают специальный инструмент. С целью полного использования режущих свойств инструментов, марки материалов подбирают в соответствии со свойствами обрабатываемого материала и условиями операции.

Выбирая измерительные инструменты, надо учитывать в первую очередь соответствие точности инструмента заданному допуску на изготовление и затраты времени, требуемые для измерения.

При небольшом объеме выпуска главным средством измерения служат универсальные инструменты: штангенциркули, микрометры, универсальные индикаторные приборы (скобы, нутромеры, глубиномеры и т.п.). При повышении объема выпуска все в большей мере начинает оправды-

ваться использование специальных средств: предельных калибров, специальных индикаторных приборов и контрольно-измерительных приспособлений.

Чем больше объем выпуска и сложнее измерение параметра, тем целесообразней переносить функцию контроля этого параметра на работу оборудования. Вместе с этим растет значение методов автоматического получения размеров и статистического контроля.

Шероховатость поверхностей контролируют обычно визуальным сравнением обработанной поверхности с эталоном, обработанным согласно классу стандарта и поверенным прибором. Непосредственно приборами пользуются для контроля особо ответственных окончательных операций.

Выбор приспособления. Схема базирования заготовки оказывает большое влияние на конструкцию приспособления. Поэтому вначале определяется схема базирования заготовки, так как при одном и том же МТБ схема базирования может быть разной.

Схема базирования должна обеспечить доступ инструмента к обработке всех МП, МПИ, заданную точность установки, удобство установки и снятия заготовки, точность обработки.

Например, заготовку в форме вала можно базировать в патроне и центре или в центрах с односторонним поводком; при прочих равных условиях точность обработки будет разной.

При базировании корпусной детали схема базирования различается расположением опорных точек в пределах каждой технологической базы; задача заключается в том, чтобы выбрать наилучшее их расположение. После уточнения схемы базирования выясняют возможность обойтись без специального приспособления. Во многих случаях это возможно, так как номенклатура приспособлений общего назначения велика. Однако и форма заготовки, и требуемая точность обработки, и нужная производительность могут потребовать специального приспособления.

Технолог не разрабатывает конструкцию приспособления, но он должен представлять себе ее принципиальную схему; он должен также предвидеть возможные пути повышения производительности с помощью приспособлений, так как без этого можно сделать ошибку при выборе станка. Чем больше объем выпуска, тем шире пользуются специальными приспособлениями. При этом имеют в виду, что с их помощью можно не только повышать производительность станков, но и расширять их технологические возможности. Например, фасонные поверхности можно обра-

батывать на станках, не предназначенных для такой обработки, если снабдить их копировальными приспособлениями.

Нормирование операций. Важным этапом в разработке операции является нормирование работ, которое проводят с помощью формул расчета машинного времени и нормативов времени на ручные работы. Необходимо уметь определять все слагаемые штучно-калькуляционного времени.

Исходными данными для подсчета машинного времени являются данные рабочих чертежей деталей и заготовок, технологических процессов их изготовления, нормативов по режимам обработки, технологические характеристики и паспортные данные оборудования и инструмента.

Для нормирования ручных приемов и их элементов используют различного рода нормативные таблицы, графики и номограммы, в которых приведены нормы времени на выполнение типовых ручных приемов и их элементов, связанных с подготовкой рабочего места к работе, с управлением станком, со сменой, установкой и закреплением обрабатываемых деталей.

Разработка нормативных данных базируется на сборе, систематизации и математической обработке статистических данных о фактических затратах времени на ручные приемы и их элементы при выполнении существующих технологических процессов в нормальных производственных условиях и при нормальной интенсивности труда. Измерению затрат времени предшествует изучение технологического процесса и разбивка его на последовательные ручные приемы, элементы приемов и элементарные движения.

Процесс измерения продолжительности некоторых приемов получил название хронометража; для изучения отдельных ручных кратковременных приемов используют ускоренную киносъемку. Систематизируя полученные статистические данные о затратах времени на различные технологические процессы на однородном оборудовании, разрабатывают нормативные данные.

В результате нормирования определяют норму времени. Иногда вместо нормы времени указывают норму выработки, которой более удобно пользоваться при учете фактической производительности. Нормирование следует проводить высококвалифицированным работникам, хорошо знающим оборудование, инструмент, технологическую оснастку.

В зависимости от конкретных условий используются методы нормирования:

– метод технического нормирования, заключающийся в определении длительности нормируемой операции по элементам, с использованием нормативов (норму времени устанавливают в результате анализа последовательности и содержания действий рабочего и оборудования при наивыгоднейшем использовании эксплуатационных свойств);

– метод расчета норм на основе изучения затрат времени, основанный на наблюдении непосредственно в производственных условиях (используют для разработки самих нормативов, необходимых для установления технически обоснованных норм расчетным путем);

– метод укрупненного расчета, состоящий в определении нормы времени приближенно по укрупненным типовым нормативам, разработанным на основе сопоставления и расчета типовых операций и процессов по отдельным видам работ (применяют в условиях единичного и мелкосерийного производства).

Чем большее число изделий подлежит изготовлению, тем тщательнее и детальнее разрабатывают технические нормы. По мере уменьшения серии должны сокращаться и расходы на установление норм времени, на разработку технологического процесса.

Настройка технологической системы на заданную точность обработки. В зависимости от количества изготавливаемых деталей выбирают соответствующий метод настройки.

Если речь идет о единичном мелкосерийном производстве, то, как правило, выбирается метод пробных проходов на участке одной детали. Начиная со среднесерийного производства целесообразно аналитическое определение и построение теоретической диаграммы изменения точности обработки или другой характеристики качества, которая позволяет предвидеть ход процесса обработки и управлять им. Заканчивается разработка операции заполнением операционной карты.

При разработке традиционного технологического процесса в операционной карте указываются все технологические и вспомогательные переходы в заданной последовательности, указываются режимы обработки и средства технологического оснащения, нормы времени.

При разработке модульного технологического процесса в операционной карте указываются изготавливаемые МП, МПИ, их последовательность и коды их МТИ, а также вспомогательные переходы, не связанные с осуществлением МТИ (установка и снятие заготовки, ее поворот, смена инструмента), затраты времени на всю операцию, включая время на выполнение МТИ.

К операционной карте должны прикладываться карты всех МТИ, осуществляемых на операции. В карте МТИ приводится: перечень техно-

логических переходов и только тех вспомогательных переходов, которые связаны с изготовлением МП, МПИ; обрабатывающий инструмент; режимы обработки; затраты времени и необходимая оснастка. В связи с этим (строго говоря) нет необходимости повторно записывать в операционную карту оснастку, связанную с выполнением МТИ. Однако с точки зрения организации работ может оказаться удобным всю оснастку внести в операционную карту.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Этапы разработки технологического процесса изготовления детали.
2. В чем заключается гибкость организационной формы производственного процесса?
3. Каким образом применение модульной технологии способствует гибкости организационной формы?
4. Какие методы получения заготовок нашли широкое применение?
5. Методы получения заготовок корпусных деталей.
6. Методы получения заготовок валов.
7. Методы получения заготовок зубчатых колес.
8. Методы получения заготовок типа рычагов, шатунов, вилок.
9. Чем обусловлено формирование интегральных модулей поверхностей?
10. Основные принципы построения модульного технологического процесса.
11. Основные этапы выбора технологических баз для изготовления детали.
12. Что препятствует изготовлению всей детали от одного комплекта технологических баз?
13. Этапы разработки маршрута изготовления детали.
14. На что влияет выбор МТБ на первой операции?
15. Что такое заготовительный модуль поверхностей (МПз)?
16. Как определяется МПз, МПИз?
17. По каким соображениям МТИ объединяются в операции?
18. Исходные данные для разработки технологической операции.
19. Как выбирается модель станка?
20. Какими документами оформляется технологическая операция?

Раздел 3

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Технологическая подготовка производства (ТПП) – это часть технической подготовки и составляет примерно половину ее трудоемкости. ТПП – это совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства к выпуску продукции с заданным объемом и установленными технико-экономическими показателями. В свою очередь технологическая готовность производства представляет собой наличие полных комплектов конструкторской и технологической документации и средств технологического оснащения (СТО).

Глава 3.1

ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И СОДЕРЖАНИЕ ТПП

Основной целью ТПП является обеспечение высокой эффективности производства изделий требуемого качества и количества в установленные сроки и в соответствии с заданными технико-экономическими показателями, устанавливающими технический уровень изделия и минимальные трудовые и материальные затраты.

С помощью ТПП обеспечивается мобильность производства при изменении программы выпуска и освоении новых видов изделий. Работы по ТПП ведутся в двух направлениях: 1) текущая технологическая подготовка, связанная непосредственно с обеспечением технологической готовности производства; 2) разработка методов, обеспечивающих сокращение длительности и трудоемкости ТПП.

ТПП ведется на двух уровнях: на уровне предприятия и на уровне отрасли машиностроения. Во втором случае результатами разработок являются методические материалы, которыми может воспользоваться любое машиностроительное предприятие.

ТПП является сложным и трудоемким процессом, который включает комплекс разнообразных технологических работ, выполняемых на различных стадиях построения и функционирования производства. Весь процесс технологической подготовки можно разделить на две стадии:

1) проектно-технологические работы по созданию нового или реконструкции и техническому перевооружению действующего производства; 2) текущая технологическая подготовка действующего производства. К выполнению работ привлекают специалистов проектно-технологических институтов и инженеринговых фирм.

На основе анализа результатов предпроектного обследования принимают решения, определяющие основные направления технического перевооружения или реконструкции производства. *Техническое перевооружение* предполагает комплекс мероприятий, связанных: 1) с внедрением в производство новых технологических процессов; 2) с использованием на ряде рабочих мест нового оборудования; 3) с совершенствованием структуры и организации работы производственных участков; 4) с изменением количества оборудования и его расположения; 5) с внедрением средств механизации и автоматизации производства на действующих площадях.

Реконструкция производства дополнительно предусматривает расширение действующих цехов или создание новых производственных зданий.

Разработанные решения, определяющие основные направления технического перевооружения и реконструкции производства, утвержденные руководством предприятия и инвесторами, оформляют в виде задания на проектирование. В ходе разработки *проектов технического перевооружения или реконструкции* участков, цехов и предприятия в целом решается комплекс взаимосвязанных вопросов технологического, организационного и строительного проектирования.

ТПП в зависимости от типа производства различается степенью детализации. Чем больше серийность производства, тем подробнее проводится ТПП и тщательнее разрабатываются технологические процессы.

Полученные в результате разработки ТПП данные о трудоемкости далее используют для основных технологических расчетов и обоснования проектных решений по количеству оборудования и числу рабочих мест, по составу и структуре оборудования производственных участков и линий. Очень важным вопросом в технологической подготовке технического перевооружения и реконструкции производства является выбор вариантов и разработка детальных планов расположения оборудования и рабочих мест, а также определение численности работающих.

При разработке проектов реконструкции производства возникает необходимость строительного проектирования, а также более углубленной проработки энергетической и санитарно-технической части проекта.

К выполнению этих работ обычно привлекают специализированные проектные организации. Заданием на их разработку являются объемно-планировочные решения и необходимые расчетные данные, выполненные в технологической части проекта.

ТПП на уровне предприятия включает решение задач, которые группируются по следующим основным функциям:

- 1) обеспечение технологичности конструкции изделий;
- 2) разработка технологических процессов;
- 3) проектирование и изготовление средств технологического оснащения (СТО);
- 4) контроль и управление технологическими процессами.

Под функцией понимается комплекс задач по технологической подготовке производства, объединенных общей целью их решения. *Задачами функции обеспечения технологичности конструкции изделия являются:* а) проведение технологического контроля конструкторской документации; б) оценка уровня технологичности конструкции изделия; в) отработка конструкции изделия на технологичность; г) внесение необходимых изменений в конструкцию изделия и документацию.

Задачами функции разработки технологических процессов являются: а) разработка, стандартизация и применение типовых технологических процессов и операций на сборочные единицы и детали; б) разработка и применение рабочих технологических процессов на сборочные единицы и детали; в) организация на уровне предприятия фондов документации на типовые технологические процессы и операции.

Задачами функции проектирования и изготовления средств технологического оснащения являются: а) проведение унификации и стандартизации СТО; б) организация применения СТО, в том числе унифицированных и стандартных средств, использование баз проката СТО; в) проектирование и изготовление специальных СТО.

Основными задачами функции организации контроля и управления технологическими процессами являются: 1) сравнение заданных и фактических значений параметров качества изделий; 2) анализ причин отклонений параметров качества изделий; 3) принятие технологических решений о ликвидации возникших отклонений параметров качества изделий; 4) разработка и внедрение в производство мероприятий, обеспечивающих стабилизацию параметров качества изделий.

В отличие от функций ТПП, выполняемых до начала непосредственного производства изделия, указанная функция реализуется при производстве изделия в реальном масштабе времени.

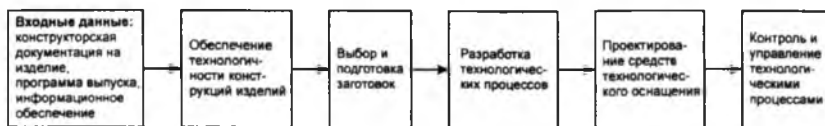


Рис. 3.1.1. Структура системы ТПП

В соответствии с перечисленными функциями структура системы ТПП имеет вид, представленный на рис. 3.1.1, и отражает основные информационно-функциональные связи.

Входными данными для системы ТПП (см. рис. 3.1.1) являются: конструкторская документация на изделие, конструкторская документация на директивную заготовку, программа выпуска изделий, информационное обеспечение.

Выходными данными системы ТПП являются соответствующие технологические и конструкторские документы, к основным из которых относятся: 1) чертежи изделий (деталей, сборочных единиц), отработанных на технологичность; 2) чертеж заготовки; 3) технологический процесс изготовления заготовки; 4) заказ на изготовление заготовки; 5) технологический процесс изготовления деталей и сборки; 6) изменения конструкций деталей и сборочных единиц; 7) заказ на СТО; 8) чертежи СТО; 9) изменения технологического процесса изготовления деталей и сборки.

Информационное обеспечение ТПП делится на две группы: инвариантное функциям ТПП и функционально-ориентированное. *Первая группа содержит:*

1) данные об имеющемся технологическом оборудовании, используемых технологических методах и процессах, производственных площадях и их загрузке, технологической оснастке и других имеющихся в наличии ресурсах производства;

2) текущие технико-экономические показатели предприятия и данные об экономической ситуации на рынке выпускаемой предприятием продукции;

3) данные о реальных конструктивно-технологических параметрах поступивших заготовок и уже выпущенных изделий, полученные по результатам входного контроля заготовок и приемочного контроля изделий (например, опытной партии);

4) оперативную информацию о ходе реализованных технологических процессов, включающую данные операционного контроля технологического процесса или обрабатываемой заготовки после завершения определенной технологической операции;

5) общие методы принятия технологических решений и их оптимизации.

Ко второй группе относятся:

1) правила выбора показателей и обеспечения технологичности конструкции изделий, сборочных единиц, деталей – для функции обеспечения технологичности конструкции изделий;

2) правила выбора вида, метода изготовления и конструирования исходных заготовок – для функции выбора и подготовки заготовок;

3) правила разработки, организации и применения технологического процесса, правила выбора СТО – для функции разработки технологического процесса;

4) правила проектирования – для функции проектирования СТО;

5) методы выявления причин отклонений хода технологического процесса, методы и правила принятия и реализации технологических решений по ликвидации отклонений в ходе технологического процесса – для функции контроля и управления.

Работы по ТПП на уровне предприятия обычно сосредоточены в отделе главного технолога (ОГТ) и технологических бюро цехов.

Составление технологической документации входит в обязанности специализированных технологических и машинных бюро ОГТ. Планирование технической (конструкторской и технологической) подготовки производства осуществляет специальная группа (бюро), подчиняющаяся непосредственно главному инженеру. Цеховые технологические бюро продолжают работу ОГТ, занимаясь в основном внедрением переданной им технологии в производство, инструктируя рабочих при ее освоении, помогая совершенствовать приемы и методы работы, выявляя степень экономической целесообразности применяемой оснастки и т.п.

Распределение работ по ТПП между ОГТ и цеховым технологическим бюро зависит прежде всего от типа производства.

На заводах единичного и мелкосерийного производства технологическая подготовка ведется децентрализованно. Общее методическое руководство ТПП осуществляет ОГТ или ОГМЕТ (отдел главного металлурга). Проведение работ по ТПП полностью возлагается на технологические бюро цехов.

На заводах крупносерийного и массового производства все работы ведут централизованно в ОГТ и ОГМЕТ, а цеховым технологическим бюро осуществляется внедрение разработанных технологических процессов, их корректировка и контроль, последующая рационализация.

На заводах со среднесерийным выпуском продукции при ее различных объемах встречается смешанная система организации ТПП, при которой для объектов устойчивой номенклатуры ТПП ведут централизованно, а для часто сменяемых изделий – децентрализованно (в цехах).

При централизованной организации ТПП службы ОГТ, как правило, специализируются по видам работ: бюро механической обработки, бюро покрытий и термической обработки и т.п.

В зависимости от типа производства, сложности изготавливаемых изделий и уровня предъявляемых к ним требований ТПП проводят с различной степенью детализации. В условиях массового и крупносерийного производства, а также при изготовлении единичных экземпляров сложных, ответственных изделий, ТПП необходимо вести особенно тщательно. При серийном, мелкосерийном и единичном типах производства простых и недорогих изделий ТПП может быть ограничена предварительной разработкой минимально необходимых технологических и конструкторских документов и данных, а их конкретизация и детализация поручается работникам цеховых технологических служб.

Насколько грамотно будет организована ТПП и широко будут использоваться современные достижения в области техники и технологии, а также применяться современные средства механизации и автоматизации инженерного труда, настолько эффективна будет сама ТПП.

С целью поднятия уровня организации, качества и эффективности ТПП была создана единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП).

ЕСТПП – это установленная государственными стандартами система организации и управления процессом технологической подготовки производства, предусматривающая применение прогрессивных типовых технологических процессов, стандартной технологической оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов, инженерно-технических и управленческих работ. В ЕСТПП изложены единые правила, по которым должна осуществляться ТПП, знание которых позволяет эффективно организовывать и управлять ТПП.

Документации на методы и средства ТПП разрабатывают в соответствии с требованиями Государственной системы стандартизации, ЕСТПП, в том числе:

- единой системы конструкторской документации (ЕСКД);
- единой системы технологической документации (ЕСТД);
- единой системы классификации и кодирования технико-экономической информации;

единой системы государственного управления качеством продукции (ЕСГ УКП) и др.

Порядок формирования и применения документации на методы и средства ТПП определяется отраслевыми стандартами, стандартами предприятий и документацией, разработанной в соответствии со стандартами ЕСТПП.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое технологическая подготовка производства?
2. В чем разница между технологическим перевооружением производства и его реконструкцией?
3. Перечислите основные функции ТПП.
4. Задачи функции обеспечения технологичности конструкции.
5. Задачи функции разработки технологических процессов.
6. Задачи функции проектирования и изготовления средств технологического оснащения.
7. Задачи функции организации контроля и управления технологическими процессами.
8. Что входит в состав входных данных системы ТПП?
9. Что входит в состав выходных данных системы ТПП?
10. Какие подразделения предприятия осуществляют ТПП?

Глава 3.2

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Эффективность ТПП обеспечивается качеством реализации перечисленных выше ее функций.

Основное содержание работ по ТПП включает:

- 1) установление требований к изделию по показателям технологичности;
- 2) анализ организационно-технического уровня производства;
- 3) разработка плана мероприятий по повышению организационно-технического уровня производства;
- 4) определение потребностей в средствах технологического оснащения;
- 5) классификация деталей, сборочных единиц изделия и привязка их к действующим типовым технологическим процессам;
- 6) разработка технологических процессов изготовления, контроля, испытания деталей, сборочных единиц, изделия;
- 7) разработка технических заданий на опытно-конструкторские работы по созданию специальных средств технологического оснащения;
- 8) разработка конструкторской документации на специальные средства технологического оснащения, а также механизацию и автоматизацию производственных процессов;
- 9) расчет плановой трудоемкости изготовления изделия;
- 10) изготовление средств технологического оснащения;
- 11) переналадка технологической оснастки и оборудования;
- 12) внедрение разработанных технологических процессов и отладка всего технологического комплекса;
- 13) поверочный расчет технико-экономических показателей изготовления изделия, оценка и аттестация технологических процессов и технического уровня производства и др.

Все эти работы распределяются по основным функциям ТПП и рассмотрены ниже.

3.2.1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

Обеспечение технологичности конструкции изделия (ТКИ) включает отработку изделия на технологичность с последующим совершенствованием условий выполнения работ при производстве, эксплуатации, ремонте и утилизации изделий.

Большинство задач, связанных с обеспечением технологичности конструкции изделия, трудно поддаются формализации, поэтому резуль-

таты их решения во многом зависят от опыта, знаний и интуиции исполнителей. Основные этапы обеспечения технологичности конструкции изделия и их последовательности приведены на рис. 3.2.1.

Технологический контроль конструкторской документации на изделие имеет целью выявление степени ее соответствия реальным производственным условиям. Содержание технологического контроля заключается в проверке учета конструктором технологических требований к конструкции изделия как объекта производства, эксплуатации, ремонта и утилизации.

Различают следующие виды контроля:

- в зависимости от организации работ – внутренний, внешний, входной;
- в зависимости от объема контроля – сплошной, выборочный.

Внутренний контроль выполняется во время разработки конструкторской документации специалистами той организации, которая занимается этой разработкой.

Внешний контроль выполняется во время разработки конструкторской документации (до завершения разработки рабочей документации) специалистами предприятия-изготовителя.

Входной контроль выполняется специалистами предприятия-изготовителя после разработки рабочей конструкторской документации и передачи ее предприятию-изготовителю, не являющемуся разработчиком этой документации.

При *сплошном контроле* проверяется полный комплект конструкторской документации, при *выборочном* – некоторая ее часть.

При технологическом контроле проектной и рабочей конструкторской документации применяются разнообразные методы сравнительной (качественной и количественной) оценки.

Методы сравнительной качественной оценки составляют основу технологического контроля на всех этапах разработки рабочей конструкторской документации. Сущность их заключается в непосредственном сравнении (сопоставлении) контролируемого технического решения с решением, принятым за эталон. В результате сравнения в качестве оценочного критерия выбирается одна из альтернатив: "лучше" или "хуже", "рационально" или "нерационально", "хорошо" или "плохо", "допустимо" или "недопустимо" и т.п.



Рис. 3.2.1. Последовательность работ по обеспечению Технологичности конструкции изделия

В качестве *эталона* для *сравнительной оценки* принимаются:

- конструкция изделия-аналога из числа находящихся в производстве;
- конструкция изделия, исполнение которого представляет собой типовую структурную компоновку (для сборочных единиц) или комплексную деталь (для деталей);
- нормативно-технические требования к изделию, регламентированные в действующих нормативно-технических документах с учетом тенденций развития данного вида техники и производства;
- личный опыт исполнителя, осуществляющего технологический контроль (при достаточно высокой квалификации исполнителя).

Методы сравнительной количественной оценки применяются при технологическом контроле в случаях, когда необходимо дополнить качественную оценку ТКИ сравнением контролируемого технического решения с решением, принятым за эталон, по основным показателям технологичности или по отдельным показателям, выражающим технологическую рациональность и преемственность конструкции изделия.

Исправления и изменения, связанные с результатами технологического контроля, вносят в конструкторские документы.

В заключение должна быть выдана общая оценка технологичности конструкции изделия, приведены принципиальные предложения по изменению конструкции с целью повышения уровня технологичности, а в случае необходимости – рекомендации по проведению поисковых и экспериментальных работ.

После оценки уровня технологичности становятся достаточно ясными недостатки конструкции, что позволяет наметить основные конструктивно-технологические мероприятия, подробно разрабатываемые на этапе отработки конструкции на технологичность.

Отработка конструкции на технологичность проводится на всех стадиях проектирования изделия (техническое предложение, эскизный и технический проекты, рабочая конструкторская документация), при ТПП и, когда это обосновано, при изготовлении изделия.

После подготовки рабочей конструкторской документации эффективность отработки конструкции на технологичность резко падает, так как в этом случае невозможны принципиальные изменения (а именно они дают максимальный эффект).

Для обеспечения технических требований при изготовлении конструктивных элементов изделия необходимо принятие соответствующих технологических решений, которые можно рассматривать как фрагменты укрупненного технологического проектирования. На этом этапе отработки конструкции изделия на технологичность намечают основное содержание необходимых технологических переходов, операций, отдельных

фрагментов или даже процесса в целом; осуществляют предварительный выбор оборудования, СТО и т.д. При этом следует учитывать реальные технологические возможности предприятия-изготовителя. По сути, необходимо решить, возможно ли изготовление изделия в условиях предприятия-изготовителя и каким образом, с помощью какого технологического оборудования и СТО. Желательно, чтобы принимаемые технологические решения хотя бы по качественным оценкам приближались к оптимальным для заданных условий.

Ответственным за обеспечение технологичности изделия является предприятие (организация) – разработчик изделия.

Отработку конструкции изделия на технологичность при выполнении опытно-конструкторских работ целесообразно проводить на основе комплексного использования специальных методов и приемов конструирования, обеспечивающих технологическую рациональность и преемственность конструкции изделия. Наиболее распространенные методы, используемые при отработке конструкции изделия на технологичность, и общие рекомендации приведены в работе [10].

При отработке изделия на технологичность дифференцированно рассматривают технологические требования к исходным материалам, конструктивному исполнению деталей, соединений и сборочных единиц.

Заканчивается отработка конструкции изделия на технологичность внесением необходимых изменений в конструкцию изделия и его документацию.

3.2.2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Задачами этой функции на предприятии являются разработка рабочих и типовых технологических процессов на детали и сборочные единицы; разработка управляющих программ для оборудования с ЧПУ; организация фондов документации на типовые технологические процессы и операции.

Разработка единичных технологических процессов осуществляется или путем индивидуального проектирования, или на основе использования типовых процессов (процессов-аналогов).

Индивидуальную разработку единичных технологических процессов осуществляют при отсутствии процессов-аналогов.

Технологический процесс разрабатывают на основе предварительно составленного межцехового технологического маршрута (расцеховки). Расцеховка определяет поэтапное движение деталей, сборочных единиц и самого изделия в процессе их изготовления.

При использовании процесса-аналога структура и содержание единичного процесса и его операций в значительной степени определяется аналогом.

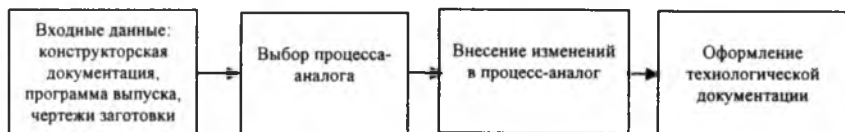


Рис. 3.2.2. Последовательность разработки единичного технологического процесса на основе процесса-аналога

При разработке единичных технологических процессов изготовление деталей на основе процессов-аналогов выполняют в соответствии с этапами, приведенными на рис. 3.2.2. Важным этапом решения является выбор процесса-аналога на основании имеющейся классификации деталей.

Для этого используется конструкторско-технологический классификатор, с помощью которого определяется принадлежность изготавливаемой детали соответствующей группе по конструктивно-технологическим признакам.

В промышленности нашел применение технологический классификатор деталей (ТКД) машиностроения и приборостроения, являющийся продолжением и дополнением классификатора ЕСКД (классы 71 – 76), разработанного в качестве информационной части ГОСТ 2.201–80.

Классификатор ЕСКД включает 100 классов, из которых 51 составляют пока резерв для размещения новых видов изделий.

Классификатор деталей имеет важное значение, так как с его помощью проводится анализ изготавливаемых деталей, их группирование, унификация и стандартизация как самих деталей, так и технологических процессов, а также производится поиск процессов-аналогов.

Технологический классификатор деталей представляет собой систематизированный в виде классификационных таблиц свод наименований общих признаков деталей, состоящий из частных признаков и кодовых обозначений. Структура полного конструкторско-технологического кода детали состоит из обозначения детали по ГОСТ 2.201–80 и технологического кода, содержащего четырнадцать знаков. Технологический код состоит из двух частей:

- постоянной части из шести знаков (рис. 3.2.3, а);
- переменной части из восьми знаков (рис. 3.2.3, б).

Структура переменной части (см. рис. 3.2.3, б) технологического кода зависит от технологического *метода изготовления деталей*: литье;ковка и объемная штамповка; листовая штамповка; процессы резания; термическая обработка и т.д.

Существенные недостатки данного классификатора состоят в том, что в нем не находят отражение связи между поверхностями, дифференциация требований качества поверхностей детали, которые оказывают

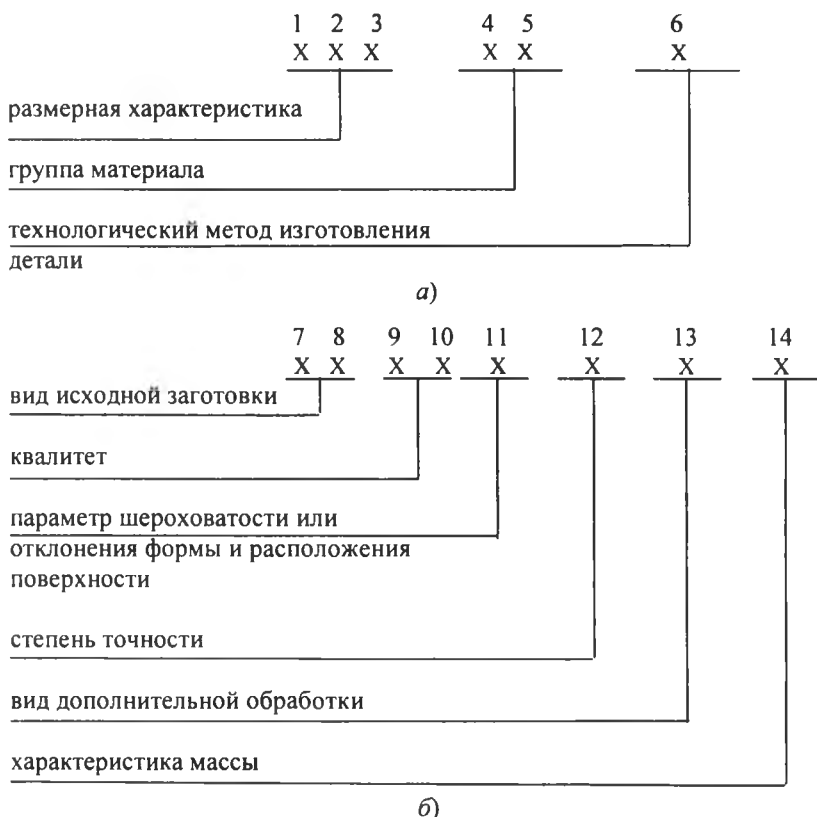


Рис. 3.2.3. Структура технологического кода детали:

а – постоянная часть кода; б – переменная часть кода

существенное влияние на технологический процесс ее изготовления. Это говорит о необходимости проведения работ по совершенствованию классификатора деталей.

При применении технологического классификатора формируется код изделия, который является основой для выбора процесса-аналога. Сведения о процессах-аналогах входят в состав информационного обеспечения системы ТПП.

Для поиска процесса-аналога проводят сравнение кодов изделия, на которое разрабатывают технологический процесс, и изделий-представителей, данные о технологических процессах изготовления которых имеются в информационном обеспечении. В случае нахождения процес-

са-аналога его параметры принимают за основу создаваемого единичного процесса.

В процессе разработки технологического процесса проводится оценка принимаемых технологических решений по параметрам маршрутной и операционной технологии.

При оценке используют различные количественные и качественные технико-экономические критерии. Если параметры спроектированной маршрутной и (или) операционной технологии не отвечают заданным критериям, то принимают решение об изменении технологического процесса. В зависимости от степени несоответствия его параметров критериям необходимые изменения вносят либо на этапе редактирования, либо на этапе выбора процесса-аналога. В последнем случае возможна корректировка конструкторско-технологического кода детали и поиск нового процесса-аналога с выполнением всех последующих этапов разработки.

В процессе разработки возможен возврат на этапы разработки операционной и (или) маршрутной технологии с повторением всех последующих действий. Изменения вносят итерационно до тех пор, пока параметры разрабатываемого процесса не будут удовлетворять заданным критериям.

Кроме инвариантного функциям ТПП информационного обеспечения для разработки единичных технологических процессов изготовления деталей и сборки изделий используют руководящую и справочную информацию. Руководящая информация включает данные, изложенные в отраслевых стандартах, которые устанавливают требования к технологическим процессам и методам управления ими, а также в стандартах на оборудование и оснастку; в документации на действующие единичные, типовые и групповые процессы; в классификаторах технико-экономической информации; в технологических нормативах (режимов обработки, припусков, норм расхода материалов и др.); в производственных инструкциях и документации по технике безопасности и промышленной санитарии.

Справочная информация содержит данные, представленные в технологической документации опытного производства; в описаниях прогрессивных методов изготовления и ремонта; каталогах, паспортах, справочниках, альбомах компоновок прогрессивных СТО; в схемах планировки производственных участков, а также в методических материалах по управлению технологическими процессами.

Комплектность и формы документации, в которой представляют результаты выбора и разработки технологических процессов изготовления заготовок, зависят от видов и методов последних и регламентируются соответствующими стандартами ЕСТД.

3.2.3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ

К средствам технологического оснащения (СТО) относятся технологическое оборудование, оснастка, средства механизации и автоматизации производственных процессов. В состав этой функции входят:

- 1) разработка технического задания на проектирование СТО;
- 2) проектирование специальных приспособлений;
- 3) проектирование переналаживаемых приспособлений;
- 4) выбор универсальных СТО;
- 5) проектирование и выбор СТО процессов контроля;
- 6) проектирование и выбор вспомогательной технологической оснастки и инструмента.

При ТПП, как правило, проектируют нестандартную, специальную технологическую оснастку, средства механизации и автоматизации производственных процессов.

Любое СТО может быть выбрано из одноименного множества. Обычно это касается технологического оборудования, а также технологической оснастки и средств механизации и автоматизации стандартных конструкций.

Выбор СТО осуществляется в следующей последовательности:

- 1) определяют точное название требуемого СТО, для оборудования – группу и тип;
- 2) формируют основные требования (ключ поиска) к искомому СТО;
- 3) выполняют поиск в соответствии с требованиями (ключом поиска);
- 4) оформляют заказ на приобретение найденного СТО.

Исходные данные для поиска содержатся в техническом задании на СТО.

Выбор технологического оборудования и оснастки основывается на анализе затрат, связанных с реализацией технологического процесса в установленный промежуток времени при заданном качестве изделия. Анализ затрат предусматривает сравнение вариантов при прочих равных условиях и выбор наилучшего.

Выбор технологического оборудования в соответствии со стандартом ЕСТПП начинается с анализа формирования типовых поверхностей деталей и сборочных единиц и методов их обработки с целью определения наиболее эффективных методов обработки и сборки, исходя из назначения и параметров изделия.

Выбор оборудования производят по главному параметру, т.е. в наибольшей степени соответствующий его функциональному назначению и техническими возможностями.

Физическая величина, характеризующая главный параметр, устанавливает взаимосвязь оборудования с размером изготавливаемого на нем изделия.

Выбор технологической оснастки осуществляется в следующей последовательности:

1) проведение анализа характеристик, организационных и технологических условий изготовления (схема базирования и закрепления, вид технологической операции, организационная форма процесса изготовления и т.д.);

2) группирование технологических операций;

3) определение исходных требований к технологической оснастке;

4) отбор конструкции оснастки.

При выборе технологической оснастки используют нормативно-техническую (стандарты) и техническую (альбомы типовых конструкций, каталоги, паспорта на технологическое оборудование, методические материалы) информацию.

Выбор предшествует проектированию СТО, которое проводят в случае, если он не дал желаемых результатов. Если искомое СТО найдено, то оформляют заказ на его приобретение (покупку или получение со склада).

3.2.4. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Данная функция ТПП непосредственно связана с производственной реализацией результатов разработок и технологических решений.

При разработке технологических процессов изготовления изделий для каждой операции определяют входные и выходные параметры качества изделия и их допустимые значения. Фактические значения параметров качества изделия, достигнутые при реализации технологических процессов, могут отклоняться от заданных, причем эти отклонения могут превышать допустимые.

В ходе выполнения функции контроля и управления технологическим процессом разрабатывают и внедряют мероприятия, обеспечивающие устранение дестабилизирующего действия факторов и приведение к заданным значениям тех параметров качества изделий, отклонения которых превышают допустимые.

Рассматриваемая функция ТПП выполняется при изготовлении установленной, контрольной серии изделий, а также в период установившегося производства.

При изготовлении установочной и контрольной серий изделий разрабатываемые и внедряемые мероприятия направлены на повышение

надежности принятых технологических решений и систем до уровня, обеспечивающего стабильное качество изделий в установившемся производстве.

В период установившегося производства изделий главной целью рассматриваемой функции является стабильное обеспечение заданного качества для всего объема выпуска. При этом основное внимание следует уделять быстрому и эффективному реагированию технологических служб на возникающие изменения штатного хода технологического процесса.

Анализ причин отклонений качества является важнейшим этапом выполнения рассматриваемой функции ТПП.

При анализе причин отклонений качества используют аппарат математической статистики; регрессивного, дисперсионного, корреляционно-го анализов, а также другие математические методы.

При невозможности количественного анализа проводят качественный анализ причин отклонений, основывающийся на накопленном опыте и знаниях. Такой анализ можно выполнять с помощью специализированных автоматизированных систем на базе вычислительной техники.

Чем выше ответственность и сложность изделия, чем больше затрат требует техническая подготовка его производства и чем большими сериями его выпускают, тем большее число альтернативных технологических решений рассматривают, тем больше внимания уделяется организации контроля и управления технологическими процессами.

Указанная работа выполняется при тесном взаимодействии цеховых технологических служб, ОГТ, работников ОТК и заводских лабораторий.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цель технологического контроля конструкторской документации на изделие.
2. В чем разница между внутренним, внешним и входным контролями?
3. На каких стадиях разработки изделия осуществляется технологический контроль?
4. На какие группы делятся показатели технологичности конструкции изделия?
5. Базовые показатели технологичности конструкции изделия и способы определения их значений.
6. Что такое процесс-аналог?
7. Структура технологического классификатора деталей.
8. Чем вызвана необходимость контроля и управления технологическими процессами?

Глава 3.3

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Важнейшей частью информационного блока ТПП является *элементная база* (ЭБ) технологического обеспечения. Она является основой ТПП и во многом определяет ее качество, трудоемкость и сроки.

3.3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

ЭБ технологического обеспечения представляет собой совокупность методов, способов, технологических переходов и операций по получению заготовок, изготовлению деталей и сборке изделий, а также элементов средств технологического оснащения (станки, сборочные машины, оснастка и др.), из которых строятся технологические процессы и технологические системы. В состав ЭБ могут входить также и сами технологические процессы и системы.

К сожалению, до сих пор отсутствует сама постановка задачи создания единой ЭБ как самостоятельной части ТПП. В то же время на каждом машиностроительном предприятии имеется своя локальная ЭБ, существующая, как правило, в неявном виде и представляющая собой перечень типовых технологических процессов и операций, ведомостей средств технологического оснащения, стандартов, различного рода альбомов, справочно-нормативной литературы, технической литературы и различного рода методических разработок (к сожалению, слабо связанных между собой и зачастую не отвечающих современным достижениям).

Такие ЭБ формируются в значительной степени стихийно и раздельно по отдельным составляющим.

Отсутствие строго оформленной ЭБ приводит к существенным потерям эффективности ТПП, повышает ее трудоемкость, снижает качество разрабатываемых технологических процессов и средств технологического оснащения. Поэтому организация единой ЭБ является актуальной задачей и требует участия в ее разработке высококвалифицированных специалистов.

ЭБ характеризуется качеством, организацией и состоянием. Качество ЭБ определяется в первую очередь качеством ее элементов, полнотой и соответствующим описанием их характеристик. Под качеством элементов понимается их соответствие последним достижениям науки и техники, а полнота ЭБ определяется соответствием состава ЭБ потребностям предприятия или отрасли.

Поиск наилучших элементов представляется сложной задачей, т.к. за время развития машиностроительного производства накоплено огромное разнообразие методов, способов, приемов, технологических решений, операций, процессов, оборудования, оснастки и др. При этом, не все они опубликованы, а те, которые опубликованы, находятся в огромном множестве источников, которые не просто найти.

Каждое предприятие формирует ЭБ на основе опыта своих специалистов, имеющих ограниченные знания. Поэтому если сопоставить ЭБ двух предприятий, выпускающих одинаковую продукцию в одних и тех же объемах, можно с уверенностью утверждать, что они будут существенно отличаться друг от друга.

Определение необходимой полноты ЭБ тоже представляется сложной задачей: из-за неопределенности постановки задачи; из-за отсутствия прямых связей между элементами; вследствие неполноты описания самих элементов.

Неопределенность постановки задачи заключается в том, что в современных условиях программа выпуска в значительной степени непредсказуема и потому нельзя точно определить требуемое технологическое обеспечение.

Одним из важным требований ЭБ является наличие прямых связей между ее элементами. Отсутствие связей между элементами технологического обеспечения приводит к избыточности как самих элементов, так и технологических возможностей, закладываемых в элементы. Для одного и того же изделия можно найти значительное число вариантов технологических процессов и СТО, из которых сложно выбрать наилучшие.

Неполнота описания элементов заключается в частичном отсутствии их характеристик, которые необходимы для выбора элементов при построении технологических процессов или технологических систем. Например, если речь идет о станке, необходимо знать не только габариты рабочей зоны, геометрическую точность станка, но также точность установки и ожидаемую погрешность обработки при разных режимах по разным показателям точности детали и т.д.; неполнота информации приводит к определенному несоответствию содержания ЭБ требованиям производства.

ЭБ должна быть хорошо организована. Существующие на предприятиях средства технологического обеспечения, как правило, не представляют единую систему. Поэтому когда технолог разрабатывает технологические процессы, ему приходится затрачивать много времени на поиск

нужной информации в различных источниках, при этом информация часто бывает неполной, с расплывчатым описанием элементов и в ряде случаев устаревшей. В итоге технолог в значительной степени руководствуется своим опытом, знанием элементов технологического обеспечения, что приводит к далеко не лучшим решениям. Следовательно, ЭБ должна быть организована таким образом и в таком виде, чтобы для поиска нужной информации не уходило много времени, поэтому она должна быть оснащена соответствующими информационно-поисковыми системами.

Большое влияние на эффективность применения ЭБ оказывает ее состояние. Состояние ЭБ описывается, прежде всего, качественным состоянием входящих в нее элементов, а также элементов СТО, состояние которых характеризуется еще и количеством каждого элемента и нахождением его в производственных подразделениях.

Отсутствие какого-либо элемента СТО в нужном количестве приводит к прерыванию производственного процесса. В реальных производственных условиях многие элементы СТО могут находиться в разных подразделениях в разном состоянии. Поэтому в понимание состояния ЭБ должно входить не только качественное состояние элементов СТО, но и соответствие их требуемому количеству и местоположение элементов.

Состояние ЭБ изменяется во времени из-за утери элементами своего качества, выхода из строя, морального и физического износа, поэтому должен осуществляться контроль, чтобы вовремя заменять износившиеся или вышедшие из строя элементы, а также заменять элементы на более совершенные и возобновлять их в требуемых количествах.

Эффективность организации ЭБ зависит от уровня ее формализации: чем выше уровень формализации, тем успешнее можно применять компьютеры с соответствующим программным обеспечением и оснащать ЭБ необходимыми базами данных и знаний. В этих условиях у технолога появляется возможность не только пользоваться ЭБ как банком данных, но и выбирать наилучшие варианты из альтернативных.

Отсутствие единой ЭБ машиностроительного производства привело к тому, что информация о созданных средствах технологического обеспечения охватывает лишь небольшую ее часть. Это, в свою очередь, привело к их бессистемному развитию, когда технологические процессы, оборудование, оснастка по большому счету развивались и совершенствовались в значительной степени независимо.

В итоге на сегодня, во-первых, имеет место огромная избыточность разнообразия средств технологического обеспечения, многие из которых

дублируют друг друга, и, во-вторых, значительная часть недоступна для разработчиков из-за отсутствия или недоступности информации.

В связи с изложенным очевидна актуальность создания единой строго организованной ЭБ машиностроительного производства, что позволит объединить информацию о технологическом обеспечении, свести к минимуму дублирование разработок, отбирать наилучшие решения, совершенствовать их и при создании новых производств приобретать требуемое технологическое обеспечение, не занимаясь их разработкой.

Наличие единой ЭБ позволит поднять уровень создаваемых средств за счет применения системного подхода, концентрировать усилия на развитие перспективных направлений, совершенствовать средства технологического обеспечения, своевременно заменяя морально устаревшие на новые более прогрессивные, и широко распространять лучшие решения.

ЭБ должна быть открытой, чтобы можно было включать новые элементы и заменить морально устаревшие.

Наличие ЭБ позволит осуществить широкую типизацию и унификацию элементов с позиции системного подхода.

При наличии единой ЭБ предприятия подотрасли смогут формировать свои локальные ЭБ путем использования той части единой ЭБ, которая им нужна в соответствии с изготавливаемыми изделиями и объемами выпуска.

Таким образом, создание единой элементной базы технологического обеспечения машиностроения имеет важное народнохозяйственное значение.

3.3.2. СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕХАНОСБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

ЭБ – это множество связанных между собой элементов технологических процессов, обрабатывающих и сборочных технологических систем.

Связи между элементами возникают из обслуживания изделий технологическими процессами, а последних – технологическими системами. В свою очередь у элементов имеется своя иерархия, например, у технологических процессов: операция, переход, метод; у технологических систем – станок, приспособления, инструмент.

Как уже отмечалось, машиностроение отличается громадным разнообразием перечисленных элементов, разработанных и разрабатываемых на многочисленных машиностроительных предприятиях. Это и определяет проблему создания единой ЭБ технологического обеспечения.

Для построения единой ЭБ необходимо установить номенклатуру всех элементов технологического обеспечения путем их систематизации с последующим построением классификаций.

Становление ЭБ начиналось стихийно с типизации как самих изделий, так и их технологического обеспечения. Так, например, машиностроение было разделено на подотрасли: авиастроение, станкостроение, автомобилестроение и др. В каждой подотрасли из множества изделий были выделены такие, которые отличаются высокой устойчивостью во времени и повторяемостью. Для них были разработаны типовые технологические процессы, в результате чего началось формирование ЭБ технологического обеспечения.

При построении классификаций изделий по технологическим признакам с ростом уровня элемента изделия в их иерархии число его характеристик увеличивается, в результате классификация становится чрезвычайно громоздкой. Это обстоятельство привело к тому, что до сих пор отсутствуют технологические классификации изделий как сборочных единиц.

Наиболее сложным элементом изделия, который был подвергнут технологической классификации, является деталь (ее классификатор приведен в ЕСКД). Однако этот ТКД учитывает лишь небольшую часть характеристик деталей, влияющих на построение технологических процессов.

Этих характеристик недостаточно для построения однозначного технологического процесса, так как они лишь приблизительно описывают деталь как объект производства. Действительно, детали, описанные такими характеристиками, могут существенно различаться конструктивно или, например, у конструктивно одинаковых деталей может быть разное количество поверхностей с наивысшим качеством, что приводит к существенному различию в технологических процессах. Таким образом, под одну и ту же деталь из ТКД можно разработать группу разных технологических процессов.

Приблизительное описание элемента изделия привело к отсутствию однозначной связи между изделиями и технологическими процессами.

Другой причиной многовариантности технологических процессов является то, что предприятия имеют разное технологическое оборудование под изготовление одних и тех же деталей. В результате для одних и тех же деталей разрабатываются разные типовые процессы.

Все изложенное привело к тому, в состав ЭБ входит лишь небольшое число типовых процессов или, как их называют, процессы-аналоги.

Они присутствуют главным образом в локальных ЭБ предприятий и, в меньшей степени, подотраслевых ЭБ; изложенное справедливо и для технологических операций.

Принятию в качестве элементов ЭБ технологических переходов препятствует их очень большое разнообразие, так как они зависят от геометрии изготавливаемой поверхности и обрабатываемой поверхности заготовки, их качественных показателей, технологического оборудования, инструмента, выбранного метода обработки и др.

Если еще принять во внимание наличие альтернативных методов обработки для одной поверхности, то количество технологических переходов становится настолько большим, что пропадает практический смысл включения их в состав единой ЭБ.

Таким образом, вместо элементов технологических процессов в ЭБ основу составляют методы обработки деталей и их соединений, т.е. низший уровень, что приводит к высокой трудоемкости разработки технологических процессов. Однако и на этом уровне ЭБ не оформлена должным образом, так как отсутствует необходимая полнота информации о каждом методе, а методы не сведены в единую систему.

Аналогично обстоят дела и с описанием второй части ЭБ – элементами технологических систем. Оптимальным решением задачи было бы наличие в ЭБ технологических систем под каждую технологическую операцию, однако в силу огромного разнообразия, с одной стороны, технологических операций, а с другой стороны, самих технологических систем, такой подход если где-то и реализован, то охватывает лишь небольшую часть операций на предприятиях, длительное время выпускающих одну и ту же продукцию. В итоге фактически в состав ЭБ входят не технологические системы, а лишь ее элементы, такие как станки, сборочные машины, приспособления, инструмент.

Рассмотрим этот вопрос на примере обрабатывающих технологических систем.

В связи с тем, что ЭБ технологических процессов состоит главным образом из методов обработки, то первым признаком, по которому классифицируют станки и инструмент, является метод обработки. Поэтому ЭБ составляют станки токарные, фрезерные и т.п. и обрабатывающий инструмент – резцы, сверла, фрезы и т.п.

В связи с этим технолог, разрабатывая технологические процессы, вынужден назначать станки по методам обработки поверхностей. В результате выбираются станки с избыточными возможностями по мощности, прочности, точности, размерным параметрам, техническим характе-

ристикам. То же происходит и с выбором обрабатывающего инструмента и контрольно-измерительных средств, отличающихся значительной универсальностью, а следовательно, избыточными возможностями.

Станочные приспособления классифицируются по степени специализации: универсальные, переналаживаемые и специальные. По такому признаку нельзя выбрать приспособление под технологическую операцию, так как неизвестно, каким комплектом технологических баз будет базироваться заготовка, какая требуется схема силового замыкания и т.д.

В итоге в состав ЭБ входят элементы технологических систем, напрямую не связанные с элементами технологического процесса

С другой стороны, все данные об элементах технологического оснащения содержатся в различных документах, различного рода каталогах, справочной и методической литературе, не объединенных в единую систему.

Подводя итог изложенному, можно констатировать, что единая ЭБ технологического обеспечения как структурная единица ТПП практически отсутствует.

3.3.3. ПОСТРОЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА МОДУЛЬНОМ УРОВНЕ

Сложность создания единой ЭБ заключается в непрерывном росте разнообразия изделий как по конструкции, так и по характеристикам. Соответственно под новые изделия приходится разрабатывать новые технологические процессы и средства их оснащения, разнообразие которых становится все большим из-за их непрерывного развития, совершенствования и необходимости учитывать конкретные производственные условия.

В то же время, чтобы от применения ЭБ был эффект, она должна содержать только такие элементы, которые отличаются высокой устойчивостью во времени. Таким образом, проблема построения единой ЭБ заключается в разрешении противоречия между непрерывно растущим разнообразием изделий и требованием к постоянству элементов технологического обеспечения. Разрешить это противоречие на уровне изделий и технологических процессов не представляется возможным из-за их быстрой смены, описания их большим числом характеристик, что приводит к росту разнообразия. Решение задачи должно лежать в поиске элементов изделий, длительное время остающимися постоянными, и соответствующих им элементов технологического обеспечения.

С другой стороны, как уже отмечалось, в состав ЭБ должны входить элементы, отличающиеся высокой устойчивостью во времени, так как чем дольше применяются элементы ЭБ, тем выше ее эффективность.

Однако это требование к высокой устойчивости элементов входит в противоречие с законом развития, согласно которому на место старого объекта всегда приходит новый объект. В связи с этим для получения наибольшего эффекта от применения ЭБ в ее состав включают только те элементы, которые гарантируют свое существование в течение длительного промежутка времени, но при этом ЭБ должна быть открытой для замены устаревших элементов на новые. На эффективность ЭБ также влияет частота применения элементов, которая в определенной степени зависит от их уровня.

С повышением уровня элемента повышается степень его разнообразия, так как он описывается большим числом характеристик, но при этом снижается частота применения. С понижением уровня элемента он описывается меньшим числом характеристик, но при этом увеличивается степень его повторяемости, так как теоретически он может участвовать в большем количестве элементов старшего уровня (например, подшипник реже применяется в изделиях, чем болт или гайка).

Для построения ЭБ кроме связей между элементами технологического обеспечения необходима их связь с изготавливаемыми изделиями. Это необходимо для поиска соответствующих элементов технологического обеспечения при разработке технологического процесса.

Элементы изделий, технологических процессов и технологических систем рассмотрены в п. 3.3.2. Если с элементами изделий и технологических процессов сравнительно ясно, то элементы технологических систем рассмотрим подробнее.

Технологические системы (ТС) состоят из большого множества элементов, и из них нужно выбрать только те, которые непосредственно связаны с соответствующими элементами технологического процесса, т.е. с помощью которых технологическая система выполняет свое служебное назначение.

Как уже отмечалось (см. гл. 1.2.), любая ТС выполняет свое служебное назначение с помощью функциональных технологических модулей (МФТ).

У обрабатывающих ТС к МФТ относятся в первую очередь станок (МФТ_{ОО}), станочное приспособление (МФТ_{ОП}), инструментальная наладка (МФТ_{ОИ}), контрольно-измерительное устройство (МФТ_{ОК}) и др.

У сборочных ТС к МФТ относятся непосредственно сборочная машина (МФТ_{со}), приспособление (МФТ_{со}), инструментальная наладка (МФТ_{си}), ориентирующее устройство (МФТ_{су}), контрольно-измерительное устройство (МФТ_{ск}) и др. (см. рис. 1.13.5).

Каждый из перечисленных МФТ предназначен для выполнения ТС соответствующей служебной функции. Рассмотрим МФТ на примере обрабатывающих ТС.

Построение ЭБ должно начинаться с установления связей между низшими элементами изделий и (элементами) их технологического обеспечения.

Из рассмотренных элементов изделий наибольшей устойчивостью отличаются МП, МС; в первую очередь именно для них и следует строить ЭБ технологического обеспечения. В связи с этим надо установить прямые связи между МП и МС и технологическим обеспечением; с этой целью воспользуемся производственной цепочкой.

Каждое звено производственной цепочки представляет собой совокупность элементов разного уровня сложности. Поэтому для каждого звена их элементы распределяют по уровням сложности и устанавливают между элементами каждого уровня звеньев производственной цепочки горизонтальные связи, т.е. когда элементу изделия соответствует элемент технологического процесса, а последнему – элемент технологической системы (см. рис. 1.13.6).

Звено "изделие". Изделие рассматривается как объект производства и потому состав и иерархию объектов можно представить как цепочку: изделие – сборочная единица – деталь – МС – МП.

Звено "технологический процесс" можно представить цепочкой объектов: технологический процесс – операция – МТС – МТИ.

Звено "технологическая система" можно представить цепочкой объектов: технологическая система – МФТ – МО, МИ, МПр, МКИ. Связи между перечисленными элементами представлены в виде схемы на рис. 1.13.6 (с. 577)

На приведенной схеме видны вертикальные и горизонтальные связи между модулями. Как видно из схемы, объекты каждого звена расставлены по вертикали таким образом, что с понижением уровня расположения объекта снижается и уровень его сложности. Таким образом, появляется зависимость степени сложности объекта от уровня его расположения. Представителями изделия на нижнем уровне являются МС, МП и соответствующие им модули технологического обеспечения.

Построение ЭБ на примере изготовления деталей на уровне МП, предполагает следующее:

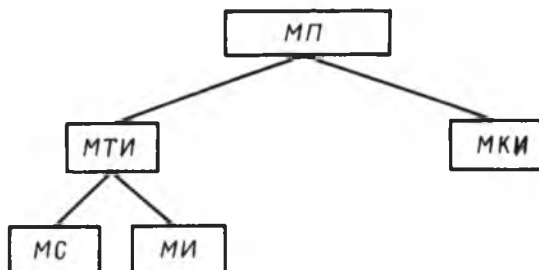


Рис. 3.3.1. Схема связей МП и модулей его технологического обеспечения

- 1) деталь представляется совокупностью МП, МПИ;
- 2) технологический процесс строится методом компоновки из модулей процессов под изготовление МП;
- 3) каждый МТИ обеспечен модулями средств технологического оснащения: станков, сборочных машин, инструментальных наладок, приспособлений и контрольно-измерительных устройств;
- 4) кодирование модулей технологического обеспечения осуществляется с учетом связей между модулями;

С этой целью строят классификации МП, МС, затем классификации модулей их технологического обеспечения, которые должны быть объединены в систему, отражающую их связи (рис. 3.3.1), затем следует провести кодирование всех элементов.

Следующим шагом в построении ЭБ является разработка под изготовление МП модулей технологического обеспечения: МТИ, МО, МИ, МКИ с учетом их связей.

Сначала должны быть разработаны МТИ на основе известных технологических решений и последних достижений науки и техники. МТИ представляет собой совокупность технологических и вспомогательных переходов определенной последовательности, при этом один МТИ охватывает группу вариантов одного типа МП, близких по своим характеристикам. Однако следует иметь в виду, что в зависимости от количества изготавливаемых МП, материала заготовки под изготовление одного варианта МП могут потребоваться разные МТИ.

Далее для осуществления каждого варианта МТИ разрабатываются и соответствующим образом кодируются МО и МИ, и МКИ. В итоге получаем ЭБ технологического обеспечения типа МП. Аналогичным образом строится ЭБ и для остальных типов МП, а также и МС.

Имеет право на существование в составе единой ЭБ и технологическое обеспечение под изготовление элементов изделий более высокого

уровня. Это целесообразно в том случае, если указанные элементы изделия отличаются высокой устойчивостью и повторяемостью (в качестве таких элементов могут рассматриваться в первую очередь стандартизованные и унифицированные элементы).

Для локальных ЭБ предприятий состав элементов изделий более высокого уровня определяется в соответствии с устоявшейся номенклатурой выпускаемых изделий и будет тем больше, чем выше уровень специализации предприятия.

При построении ЭБ технологического обеспечения для элементов изделий следующего уровня сложности их необходимо рассматривать как сумму элементов предыдущего уровня (например, технологическая операция должна состоять из суммы МТИ в соответствии с изготавливаемыми МП; инструментальная наладка на операцию должна состоять из соответствующих МИ и т.д.).

Построение единой элементной базы надо начинать с ЭБ технологического обеспечения МП и МС, а затем по мере целесообразности вводить в ее состав технологическое обеспечение элементов изделий большей сложности после их оценки на устойчивость и частоту применения.

Например, если состав МП, изготавливаемых на операциях, становится типовым, то целесообразно вводить его вместе с технологическим обеспечением в ЭБ следующего уровня и т.д., вплоть до типовых технологических процессов в модульном исполнении.

В построенной таким образом ЭБ устойчивость элементов во времени растет с понижением их уровня, сложности и достигает наивысшего значения на уровне МП, МС. Поэтому этим уровнем ЭБ могут пользоваться практически все машиностроительные предприятия, отбирая МП, МС тех типов и характеристик, которые соответствуют выпускаемой ими продукции. Например, часовые заводы будут использовать технологическое обеспечение для изготовления МП, МС малых размеров, а заводы по выпуску гидротурбин – другие МП, МС больших размеров.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под элементной базой технологического обеспечения?
2. Какие требования предъявляются к элементной базе?
3. В чем заключаются трудности в организации элементной базы?
4. В чем заключается эффективность применения элементной базы?
5. Какова иерархия элементов изделий?
6. Какова иерархия элементов технологического обеспечения?

Глава 3.4

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Основной целью автоматизации ТПП является повышение качества и сокращения сроков решения задач технологической подготовки, снижение стоимости и цикла действующей технологической подготовки производства.

Передача решения многих задач ЭВМ, постепенное объединение их в комплексы задач и системы проектирования привели к разработке и созданию автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП).

Под автоматизированными системами технологической подготовки производства в машиностроении понимают совокупность методов, алгоритмов, программ математического обеспечения, технических средств и организационных мероприятий, объединенных с целью автоматизированного проектирования технологической подготовки производства.

Автоматизация ТПП включает, прежде всего, автоматизацию таких функций, как разработка технологических процессов, проектирование средств технологического оснащения и поиск информации.

Функция отработки конструкции на технологичность в значительной степени является творческим процессом, поэтому трудно поддается формализации и, как следствие, автоматизации.

Автоматизации перечисленных функций характерна высокая сложность правил их автоматизированного решения, что приводит к большим затратам на создание алгоритмов и программ решения. Область применения алгоритмов и программ часто остается весьма узкой, что можно видеть на примере некоторых внедренных систем автоматизированного проектирования технологических процессов. Большинство таких систем носят локальный характер, между ними отсутствует преемственность в системах кодирования, алгоритмах и программах, что не позволяет стыковать их между собой, в то же время затраты на их создание велики, причем много усилий тратится на дублирование уже готовых решений.

В связи с этим, разрабатывая систему автоматизации технологической подготовки производства (АСТПП), следует стремиться к большей универсализации системы, чтобы в той или иной мере ее можно было использовать на различных по характеру и номенклатуре выпускаемой продукции предприятиях.

АСТПП, как и любую другую автоматизированную систему, можно рассматривать с четырех взаимосвязанных сторон: структурной, инфор-

мационной, функциональной и организационной, при этом каждой из них соответствует своя модель.

Задачи, решаемые при автоматизации ТПП, можно разделить на две группы: технические и предметные. Первые связаны с обеспечением функционирования САПР как технической системы, вторые – с формализацией методов описания, с построением классификаций и разработкой задач каждой функции ТПП. Если решением задач первой группы должен заниматься разработчик САПР при участии технолога, то решением задач второй группы – технолог при участии разработчика САПР.

Технологическая подготовка представляет собой разветвленный и сложный процесс переработки информации самого разнообразного вида, формы и содержания. Информация, используемая при технологической подготовке производства, называется технологической информацией.

Технологическая информация, перерабатываемая АСТПП, делится на условно-постоянную и переменную. Условно-постоянной называется информация, остающаяся неизменной при решении множества задач одного класса в одних условиях производства и меняющаяся при переходе к задачам другого класса или изменении производственных условий. К условно-постоянной информации относятся сведения о содержании ГОСТов, нормалей, стандартные программы, таблицы коэффициентов, сведения об установленном оборудовании, наличии на складах материалов, нормалей и т.п., необходимые при проектировании технологии какого-либо одного вида обработки, например обработки на автоматах; при переходе к проектированию других видов обработки необходима полная или частичная замена этих сведений.

Условно-постоянная информация обычно хранится в информационно-поисковой системе (ИПС) и выбирается оттуда по мере необходимости с помощью стандартных команд и программ.

Переменной называется информация, меняющаяся при решении каждой задачи (например данные о детали, которые после проектирования технологии ее обработки изымаются из АСТПП и заменяются данными о другой детали).

3.4.1. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Проблема автоматизации разработки технологических процессов заключается в наличии неопределенности связей между качественными показателями изделия, параметрами режимов изготовления, состоянием технологических систем, а также несовершенством методики разработки

процессов, низким уровнем ее формализации, многовариантностью технологических решений одной и той же задачи и др. Например, при одних и тех же режимах обработки заготовки на станках одной и той же модели точность обработки будет разной, так как станки находятся в разном состоянии, которое нигде не фиксировано. Другими примерами является выбор технологических баз при разработке технологических процессов, который осуществляется не в соответствии со строго формализованной методикой, а по ряду рекомендаций. Все это не позволяет полностью исключить участие человека из разработки технологических процессов.

При автоматизированном проектировании проектировщик должен решать творческие задачи, а компьютер – задачи, функции которых связаны в основном с выполнением нетворческих или умственно-формальных процессов при проектировании.

Дальнейшее развитие теории проектирования и вычислительной техники позволяет постепенно использовать вычислительную технику для решения творческих задач. Однако это возможно при устранении неопределенности постановки задачи, совершенствования методики разработки технологических процессов и повышения уровня ее формализации. Поэтому решение задачи автоматизации разработки технологических процессов должно начинаться с формализации методики их разработки.

При существующем состоянии методологии разработки технологических процессов в зависимости от конкретных условий различают несколько уровней проектирования: разработку принципиальной схемы технологического процесса, проектирование технологического маршрута обработки детали, проектирование технологических операций, разработку управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением.

При автоматизированном решении задачи взаимодействие технолога-проектировщика с ЭВМ представляет процесс обмена информацией в определенном режиме. Различают два основных режима: пакетный (автоматический) и диалоговый (оперативный)

При пакетном режиме технолог-пользователь и программист, как правило, не имеют прямой связи с ЭВМ. Тексты программ, результаты их проверки и решения технологической задачи передаются через оператора ЭВМ. Пакет прикладных программ представляет комплекс программ и предназначен для решения определенного класса близких друг другу технологических задач, например, проектирование технологического маршрута обработки деталей определенного класса, сборки узлов и сборочных операций заданного типа.

Диалоговый режим эффективен при решении творческих задач, когда требуется эвристический подход (распознавание геометрических образов деталей, размерных и топологических связей между элементарными геометрическими образами с целью оптимального выбора схем базирования, проектирование маршрута обработки, сборки и др.).

Вместе с тем при диалоговом режиме значительно увеличиваются затраты на создание программного обеспечения, возрастают затраты на проектирование. Можно создавать пакеты программ, позволяющих накапливать опыт проектирования и формировать алгоритмы классификации, генерирования понятий, поведение. Поэтому возникла и решается задача создания автоматизированных систем проектирования технологических процессов (САПР ТП) в режиме диалога с последующим переходом к пакетному (автоматическому) режиму более высокого уровня путем использования программ обучения.

САПР ТП имеет следующее обеспечение автоматизированного проектирования.

Методическое обеспечение – совокупность документов, устанавливающих состав и правила отбора и эксплуатации средств обеспечения проектирования, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования.

Информационное обеспечение – совокупность сведений, необходимых для выполнения проектирования, представленных в заданной форме.

Математическое обеспечение – совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме.

Лингвистическое обеспечение – совокупность языков проектирования, включая термины и определения, правила формализации естественного языка и методы сжатия и развертывания текстов, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме.

Программное обеспечение – совокупность машинных программ, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме. Программное обеспечение делят на две части: 1) общее программное обеспечение (операционная система), которое необходимо для функционирования ЭВМ; 2) специальное программное обеспечение, которое включает все программы решения конкретных проектных задач.

Техническое обеспечение – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для проектирования.

Организационное обеспечение – совокупность документов, устанавливающих состав проектной организации и ее подразделений, связи меж-

ду ними, их функции, а также форму представления результата проектирования и порядок рассмотрения проектных документов, необходимых для выполнения проектирования.

Многие из перечисленных видов обеспечения требуют разработки баз данных и, как следствие, разработку баз знаний.

Анализ различных САПРТП показывает следующее. Задачи, решаемые при разработке единичных технологических процессов изготовления деталей на основе процессов-аналогов, являются формализуемыми, что нашло отражение в создании значительного числа систем автоматизированного проектирования технологических процессов, использующих принцип типовых решений. Эти системы можно рассматривать как отдельные программные модули, которые могут входить в состав АСТПП.

Наиболее трудно формализуемой задачей, решаемой при разработке единичных технологических процессов изготовления деталей, является выбор технологических баз и создание маршрутной технологии, при разработке которой необходим синтез структуры маршрутного технологического процесса (определение состава и последовательности технологических операций). В математической постановке эта задача сводится к поиску вариантов структур в счетных множествах с весьма значительным, хотя и ограниченным числом элементов. Задачи, решаемые при разработке операционной технологии, легче поддаются формализации.

3.4.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Практически все задачи, решаемые в процессе ТПП, требуют наличия информации и ее поиска, поэтому автоматизация работ по поиску необходимой информации оказывает существенное влияние на трудоемкость и эффективность ТПП.

Информационно-поисковая система (ИПС) является одной из важнейших систем общего назначения, входящих в состав АСТПП; представляет собой совокупность методов и средств, обеспечивающих накопление, хранение и поиск информации, необходимой для решения задач технологической подготовки производства.

Первичную (предметную) информацию составляют различные технические нормалы (справочники, заводские и отраслевые стандарты, ГОСТы и т.д.), а также технические документы, поступающие из других систем или выходящие из АСТПП (например, чертежи деталей, технологические карты и т.д.). Первичную информацию последовательно обра-

батывают и подготавливают к виду, удобному для ввода в ЭВМ или в другие технические средства. Для этого при помощи формализованных языков составляют описание объектов (чертежей деталей, технологических процессов, оснастки, инструмента) и заносят их в память. Первичная информация регулярно пополняется и подвергается корректировке.

Количество массивов данных при большом числе задач, решаемых на ЭВМ, также достаточно велико, при этом многие из них, используемые для решения разных задач, содержат сходную информацию и обрабатываются аналогичным образом. Выделение однородных массивов данных и задач позволяет сократить сроки разработки и внедрения машинного решения новых задач в АСТПП.

Поэтому и возникла необходимость в информационно-поисковой системе, позволяющей единообразным для всех задач образом вводить, хранить, оперативно искать и корректировать информацию. Отсюда ИПС выполняет следующие функции: ввод постоянной информации в архив данных и преобразование ее на внутренний язык; образование из записей на внутреннем языке массивов заданной структуры и запись массивов в определенные места архива по их функциональному назначению; оперативный поиск необходимых сведений в архиве данных и выдача их отдельным подсистемам АСТПП.

В соответствии с указанными функциями в ИПС можно выделить три подсистемы: обслуживание архива; поиск и выборка информации; обработка массивов. Первая из них осуществляет ввод, преобразование и запись информации в архив, а также проведение различных изменений содержания массивов, касающихся удаления и замены устаревших характеристик объектов. Корректирование массивов данных является важной функцией данной подсистемы, так как объем проводимых изменений в технической документации современного машиностроительного предприятия очень велик, особенно в части описания чертежей деталей и технологических процессов. Подсистема поиска и выборки предназначена для нахождения характеристик заданного объекта по известным характеристикам и для определения адреса документа, содержащего описание объекта или сам документ.

ИПС можно использовать не только в качестве подсистемы АСТПП, но и как локальную систему. Тогда ИПС является средством для быстрого поиска информации при ручном решении задач технической подготовки.

Круг задач технологической подготовки производства, решаемых при помощи ИПС, весьма широк. В системе отработки объектов производства на технологичность ИПС позволяет найти по конструктивным

признакам детали-аналоги для последующего заимствования или унификации либо самих найденных деталей, либо их элементов.

В системе технологического проектирования роль ИПС более сложна, так как здесь весьма высок уровень автоматизации решения задач. Для алгоритмов автоматизированного проектирования технологических процессов характерно наличие большого числа операций выборки данных из различных массивов постоянной информации.

ИПС в данном случае используют, например, для поиска характеристик материала, оборудования, оснастки, инструмента, различных коэффициентов из нормативных таблиц режимов резания.

Итак, применение ИПС существенно влияет на качество принимаемых решений, снижает трудоемкость ТПП и повышает ее эффективность.

3.4.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

Остановимся лишь на некоторых вопросах автоматизированного проектирования специальной оснастки, имеющих общий характер, связанных с необходимостью формализации процесса проектирования, представления процессов мышления и действий проектировщика в виде алгоритмов и программ для ЭВМ, с необходимостью организации автоматизированного проектирования.

На стадии проектирования ТПП оснащение технологических процессов необходимой оснасткой сводится к выбору ее из числа имеющейся универсальной или нормализованной оснастки или к ее проектированию.

При автоматизированном проектировании специальной технологической оснастки возможны два основных варианта:

1) проектирование оснастки ведется автономно и решается как изолированная задача;

2) проектирование оснастки является частью общего автоматизированного процесса и решается во взаимосвязи с решением других задач АСТПП.

В первом случае исходные данные для проектирования оснастки подготавливаются технологом и вводятся в ЭВМ для каждого случая проектирования. Во втором случае исходные данные постепенно накапливаются и формируются автоматически в процессе проектирования технологии, главным образом при проектировании единичных технологических процессов (второй случай характерен для более высокой степени развития АСТПП).

Исходными данными для выбора или проектирования различной оснастки могут быть не только окончательные результаты проектирования типовых, групповых или единичных технологических процессов, но и ряд промежуточных данных, получаемых на разных этапах проектирования и не входящих в конечную технологическую документацию.

В ИПС автоматизированной системы проектирования основное содержание составляет условно-постоянная информация. Вся условно-постоянная информация подготавливается заранее с учетом специфических особенностей опыта и традиций конкретного производства и вводится в ЭВМ одновременно с программой проектирования.

При автоматизированном проектировании наиболее удобной является классификация приспособлений и их элементов по функциональным признакам и степени нормализации и унификации. При этом выбор классов, подклассов, групп и типоразмеров производят в зависимости от номенклатуры применяемых на данном производстве приспособлений, обрабатываемых деталей и их характеристик и от ряда других признаков, которые могут значительно отличаться в разных производственных условиях, поэтому не представляется возможным привести какую-либо единую классификацию.

При проектировании специальной технологической оснастки значительную часть условно-постоянной информации, хранимой в ИПС, составляют сведения об основных характеристиках стандартных, нормализованных, унифицированных и повторяющихся конструктивных элементов оснастки, описывающие их с достаточной степенью полноты. Эту часть условно-постоянной информации принято называть *библиотекой конструктивных элементов*.

Разработка библиотеки конструктивных элементов является одним из наиболее ответственных и трудоемких этапов подготовки к автоматизированному проектированию оснастки.

В заключение следует отметить, что большинство проблем автоматизации ТПП определяется, в первую очередь, несовершенством методик решения многих технологических задач, выражающимся в отсутствии строгих правил, их неоднозначности и низком уровне формализации. В результате в решении присутствует большая доля творчества и, как следствие, субъективность и многовариантность решений. Все это приводит к тому, что для решения этих задач требуется непосредственное участие человека; автоматизации успешно достигают там, где возможно применение типовых решений.

Разрешение перечисленных проблем должно начинаться с однозначного описания предмета производства: детали, сборочной единицы. Существующие методы описания геометрии предмета производства приводят к неполноте и неоднозначности их описания.

Все это приводит к неоднозначному пониманию и постановке задачи, что препятствует выработке единых правил изготовления деталей. Если воспользоваться модульным представлением изделия (см. гл. 1.4), то значительная часть проблем может быть разрешена.

Другой проблемой, которая препятствует автоматизации ТПП, является отсутствие во многих случаях достоверной информации о фактическом состоянии средств технологического оснащения, например, точности, жесткости и других качественных показателей. Это не позволяет оптимизировать решения при разработке технологических процессов, гарантировать заданное качество изготовления изделий. Решение проблемы лежит в аттестации СТО по качественным показателям с соответствующей периодичностью и в повышении качества расчетных методов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цель автоматизации технологической подготовки производства.
2. В чем разница между условно-переменной и переменной информацией?
3. Что входит в состав условно-переменной информации?
4. В чем заключается автоматизация разработки технологических процессов?
5. В чем разница между автоматическим и автоматизированным проектированием?
6. Что входит в состав методического обеспечения САПР ТП?
7. Что входит в состав информационного обеспечения САПР ТП?
8. Что входит в состав математического обеспечения САПР ТП?
9. Что входит в состав лингвистического обеспечения САПР ТП?
10. Что входит в состав программного обеспечения САПР ТП?
11. Цель и задачи информационно-поисковой системы.
12. Функции, выполняемые с помощью информационно-поисковой системы.
13. Что входит в состав условно-постоянной информации при проектировании станочных приспособлений?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Базров Б.М.** Расчет точности машин на ЭВМ. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.
2. **Базров Б.М.** Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с.
3. **Балакшин Б.С.** Основы технологии машиностроения. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1959. 485 с.
4. **Технологическая наследственность** в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. / Под ред. А.М. Дальского. М.: Издательство МАИ, 2000. 364 с.
5. **Качество машин:** Справочник: В 2 т. Т. 1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
6. **Базров Б.М.** Концепция совершенствования системы допусков и посадок // Справочник. Инженерный журнал. М.: Машиностроение, № 2. 2002.
7. **Адаптивное управление станками** / Под ред. Б.С. Балакшина. М.: Машиностроение, 1973. 688 с.
8. **Базров Б.М.** Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
9. **Сборка и монтаж изделий машиностроения:** Справочник. В 2 т. / М.: Машиностроение, 1983 // Т. 1. Сборка изделий машиностроения / Под ред. В.С. Корсакова, В.К. Замятина, 1983. 480 с.
10. **Технологичность конструкций изделий:** Справочник / Т.К. Алферова, Ю.Д. Амиров, П.И. Волков и др.; Под ред. Ю.Д. Амирова. М.: Машиностроение, 1985. 368 с.
11. **Справочник технолога-машиностроителя.** В 2 т. Т. 1 / Под ред. А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.

Учебное издание

БАЗРОВ Борис Мухтарбекович

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Редактор *Г.Н. Сидорова*

Переплет художника *Т.Н. Галицыной*

Корректор *М.Я. Барская*

Компьютерное макетирование *И.В. Евсеевой, Е.В. Кораблевой*

Сдано в набор 10.09.2006 г. Подписано в печать 10.01.2007 г.

Формат 60×88 1/16. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.

Гарнитура Times New Roman. Уч.-изд. л. 45,38. Усл. печ. л. 45,08.

Тираж 2000 экз. Заказ № 120

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство "Машиностроение",
107076, Москва, Строминский пер., 4

Отпечатано в соответствии с качеством
представленного оригинал-макета в ГУП ППП "Типография Наука" РАН
121099, Москва, Шубинский пер., 6