

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ

В.А. Горохов

**ОСНОВЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
И МЕТОДИКА
ИХ ПРОВЕДЕНИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ





В.А. ГОРОХОВ

ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ИХ ПРОВЕДЕНИЯ

Допущено

*Учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по образованию в области
автоматизированного машиностроения в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлениям подготовки:
«Автоматизированные технологии и производства»,
«Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных
производств», «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных и ремонтно-восстановительных производств»*

Рекомендовано

*Учебно-методическим объединением вузов Республики Беларусь
по образованию в области автоматизации технологических процессов,
производства и управления в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлениям:
«Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных
производств», «Автоматизированные технологии и производства»,
«Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»*

Минск
«Новое знание»

Москва
«ИНФРА-М»

2016

681.7

УДК 621.001.891.5(075.8)

ББК 34.4-01я73

Г70

Рецензенты:

академик Национальной академии наук Беларуси, лауреат Государственной премии БССР, доктор технических наук, профессор *В.В. Клубович*;
профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей Белорусского национального технического университета, доктор технических наук, профессор *И.С. Ивашко*

Горохов, В.А.

Г70 Основы экспериментальных исследований и методика их проведения : учеб. пособие / В.А. Горохов. — Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2016. — 655 с. : ил. — (Высшее образование).

ISBN 978-985-475-755-1.

Рассмотрены теоретические основы информационного и эвристического поиска научно-технических решений, планирования инженерных экспериментов и выполнения научных исследований. Представлены исследования различных процессов обработки, эксплуатационных свойств деталей из различных материалов и с различной обработкой рабочих поверхностей. Приведена система планирования, организации, контроля и отчетности учебно-исследовательской и научно-исследовательской работы студентов.

Для студентов и преподавателей вузов. Будет полезно представителям заводского сектора науки, магистрантам и аспирантам, системе повышения квалификации работников машиностроения.

УДК 621:001.891.5(075.8)

ББК 34.4-01я73

ISBN 978-985-475-755-1

© Горохов В.А., 2016

© ООО «Новое знание», 2016

Оглавление

Предисловие	8
Список основных условных обозначений.....	16
Глава 1. Теоретические основы планирования инженерных экспериментов и выполнения научных исследований	18
1.1. Эксперимент и обработка его результатов.....	18
1.1.1. Разновидности эксперимента и понятия метрологии.....	18
1.1.2. Ошибки измерений, методы их оценки, учета и исключения.....	24
1.1.3. Оценка истинного значения величины при ее прямых и косвенных измерениях.....	33
1.1.4. Выбор средств измерений и числа наблюдений с учетом ошибок измерений	40
1.2. Корреляционные связи и зависимости	42
1.2.1. Понятие о корреляционных связях, задачи и предпосылки.....	42
1.2.2. Применение метода наименьших квадратов.....	55
1.2.3. Достоверность результатов исследований и их оценка.....	58
1.3. Методы планирования экспериментов.....	64
1.3.1. Планирование однофакторного эксперимента.....	64
1.3.2. Планирование многофакторного (полного факторного) эксперимента.....	72
1.3.3. Дробный факторный план	80
1.3.4. Порядок выполнения плана первого порядка и крутое восхождение по поверхности отклика.....	84
1.3.5. Планы второго порядка	89
1.4. Анализ точности и стабильности процесса изготовления деталей.....	93
1.4.1. Погрешности обработки, точность и стабильность технологического процесса.....	93
1.4.2. Методы оценки и анализа точности и стабильности обработки	99
1.4.3. Законы распределения и оценка показателей точности обработки	102
1.4.4. Организация экспериментов по оценке точности и стабильности технологического процесса	106

1.4.5. Статистические методы исследований и оценки влияния факторов на точность и стабильность обработки.....	120
1.4.6. Особенности формирования статистического ряда, его графического представления и математической оценки.....	139
1.5. Методы и средства измерения в машиностроении и приборостроении.....	148
1.5.1. Разновидности измерений и практический расчет их погрешностей.....	148
1.5.2. Измерение линейных и угловых величин	154
1.5.3. Средства измерения отклонений формы, волнистости и микрогеометрии технических поверхностей	165
1.5.4. Измерение параметров движения и колебаний.....	173
1.5.5. Измерение силовых и энергетических величин	181
1.5.6. Измерение мощности.....	194
1.5.7. Измерение температуры	196
1.5.8. Осуществление механических испытаний.....	213
1.6. Противоречия, информационный и эвристический поиски решений.....	243
1.6.1. Технические и физические противоречия	243
1.6.2. Информационный поиск	251
1.6.3. Эвристический поиск	254
1.6.4. Эвристические методы направленного поиска.....	260
1.6.5. Методы разрешения (преодоления) физических противоречий.....	263
1.6.6. Алгоритм поиска научно-технических решений и примеры поисковых задач	272
1.7. Примеры улучшения качества и свойств деталей	281
1.7.1. Повышение качества деталей использованием технологической наследственности	281
1.7.2. Упрочнение материалов деталей плазменной металлизацией.....	294
1.7.3. Упрочнение материалов деталей газопламенной металлизацией.....	299
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>303</i>

Глава 2. Исследование и технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей и соединений.....	306
2.1. Требования к функциональным характеристикам изделий машиностроения и пути их реализации	306

2.1.1. Условия эксплуатации изделий, предопределяющие требования к конструкционным материалам, деталям и соединениям.....	306
2.1.2. Взаимосвязь эксплуатационных свойств с состоянием поверхностей и подповерхностного слоя материала деталей.....	314
2.1.3. Классификация параметров оценки микрогеометрии поверхности и необходимость накопления данных по поведению деталей и соединений в изделиях.....	319
2.2. Развитие теории микрогеометрии поверхностей и метрологическое обеспечение нового подхода к ее оценке	326
2.2.1. Механизм возникновения неровностей поверхностей вязкопластичных материалов.....	326
2.2.2. Моделирование поверхностей и классификация поднутренных неровностей.....	335
2.2.3. Характер взаимодействия поверхностей с твердыми телами, эластиком, газом и жидкостью	341
2.2.4. Способы оценки микрогеометрии поверхностей с ПН и их обеспечение	345
2.2.5. Математическая модель поверхности и имитационное моделирование ПН.....	356
2.2.6. Классификация поверхностей и нормирование их микрогеометрии в стадии проектирования изделий.....	363
2.2.7. Выбор способов обработки и задание параметров качества прецизионных деталей и соединений	365
2.3. Регуляризация микрогеометрии поверхностей, упрочнение материалов и их обеспечение.....	371
2.3.1. Сущность, особенности и достоинства регуляризации микрогеометрии поверхностей	371
2.3.2. Классификация, нормирование и стандартизация РМР.....	384
2.3.3. Инструмент для ППД и приспособления для безвибрационной обработки.....	390
2.3.4. Приспособления для вибрационной обработки ППД с источниками вибрации.....	401
2.3.5. Приспособления для вибрационной обработки ППД без источников вибрации.....	407
2.3.6. Оснастка для комбинированной обработки.....	418
2.3.7. Автоматизированное оборудование для обработки ППД...	425

2.3.8. Комбинированная обработка резанием и ППД.....	434
2.3.9. Методика расчета параметров и изменение микрогеометрии поверхностей при обработке ППД.....	450
2.3.10. Физико-механические параметры состояния подповерхностного слоя материала и особенности комбинированных и совмещенных процессов обработки с использованием ППД.....	461
2.3.11. Расчет параметров режима обработки и инструмента.....	471
2.3.12. Рекомендации по применению СОЖ.....	482
2.4. Улучшение и исследование эксплуатационных свойств изделий машино- и приборостроения	484
2.4.1. Влияние регуляризации микрогеометрии поверхностей и упрочнения материалов на свойства деталей и пар.....	484
2.4.2. Точность и размерная стабильность деталей.....	495
2.4.3. Коэффициент трения и прирабатываемость пар	502
2.4.4. Износостойкость пар трения	509
2.4.5. Противозадирность и сопротивление схватыванию.....	516
2.4.6. Снижение загрязненности деталей, соединений, изделий.....	520
2.4.7. Магнитоэлектрические свойства деталей и соединений.....	523
2.4.8. Чувствительность сдвига и плавность перемещения деталей в соединениях	528
2.4.9. Ламинарность перемещения газов в зазорах соединений и кумулятивность.....	531
2.4.10. Точность фасонного контура, герметичность и прочность деталей.....	540
2.4.11. Гидро- и пневмоплотность подвижных соединений.....	544
2.4.12. Коррозионная стойкость деталей, адгезия покрытий, прочность неразъемных соединений и декоративная отделка товаров народного потребления	547
2.5. Области, нормативная база и эффективность применения прогрессивной технологии в машино- и приборостроении	553
2.5.1. Отрасли эффективного применения технологического улучшения эксплуатационных характеристик деталей и соединений.....	553
2.5.2. Создание нормативной базы применения новых технологических процессов.....	556
2.5.3. Экономическая эффективность и направления развития прогрессивной технологии.....	566
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>569</i>

Глава 3. Особенности исследования наноструктурных материалов и нанотехнологий	573
3.1. Сущность наноструктур и их технологий.....	573
3.2. Средства исследования и особенности наноструктур.....	577
3.3. Исследование свойств, размерных эффектов и примеры применения наноструктурных материалов.....	588
3.4. Исследование нанотехнологий и создание средств их обеспечения.....	597
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	610
 Глава 4. Организация научно-исследовательской подготовки будущих инженеров и отчетность по НИРС	612
4.1. Организация научно-исследовательской подготовки студентов во вузах.....	612
4.2. Составление отчета по индивидуальному заданию учебно-исследовательской работы студента.....	617
4.3. Оформление доклада и текста рукописи статьи для опубликования.....	624
4.4. Описание комплексной лабораторной работы по курсу «Основы научных исследований».....	628
4.5. Примеры содержания исследовательских дипломных и курсовых проектов.....	638
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	649
 Список использованных источников.....	650
 Литература для расширения кругозора, творческого приобщения к научно-исследовательской деятельности и выбора направления научной деятельности.....	652

Предисловие

Основной чертой современного машиностроения является его непрерывное развитие на базе прогресса науки, техники и технологий. При этом грани между проектантом, производственным и исследователем стираются. Осуществлять научные эксперименты и исследования должен уметь каждый инженер, поскольку только в этом случае удастся отслеживать особенности конкретного производства и выявлять резервы повышения качества, надежности и конкурентоспособности выпускаемых изделий машино- и приборостроения.

Так, инженеру-технологу, специалисту по формообразованию материалов и отделке заготовок, сборке машин и приборов, инженеру-конструктору, специалисту по проектированию изделий и средств технологического оснащения в ходе деятельности приходится принимать много технических решений, требующих экспериментов и научных обоснований, устранения возникающих физических и технических противоречий, применения информационного и эвристического поиска научно-технических решений. Это относится, например, к выбору метода и способа обработки, структуры техпроцесса; рационализации показателей технологических операций, качества и надежности проектируемых изделий и оснащения. Критериями рационализации могут быть характеристики техпроцесса и проектируемого станка, показатели автоматизации производства, производительности машины и т.п.

Работая на промышленном предприятии, инженер по сути является представителем заводского сектора науки и должен владеть методами планирования эксперимента, анализа и обработки его результатов, приемами аналитического и эвристического поисков решений, методиками выполнения специальных технологических исследований (точности обработки, микрогеометрии поверхностей, их несущей способности и маслостойкости, износостойкости и сопротивления схватыванию, прочности, герметичности деталей, пневмогидроплотности соединений и т.д.). Ему необходимо знать возможности методов обработки заготовок и упрочнения материалов, контроля и измерения деталей, испытания изделий на функциональные показатели.

Будущий инженер еще в стенах втуза должен приобрести определенные знания, умения и навыки планирования и проведения

экспериментов, т.е. получить необходимую научно-исследовательскую подготовку. Он должен освоить основные закономерности, возникающие в процессе формообразования и отделки деталей различными методами; математические методы решения задач по обеспечению точности технологических операций; методы исследования современных технологий; тенденции и опыт развития науки и техники в машиностроительной отрасли; принципы патентования новых технологий и конструкций. Ему следует постоянно совершенствовать умение формулировать задачи исследований, оценивать их технико-экономическую эффективность и адекватно выбирать пути решения задач; анализировать результаты исследований и делать объективные выводы; давать характеристики современным методам обработки и сборки, оценивать их достоинства и недостатки; применять компьютерную технику для выполнения моделирования и расчетов; работать с научно-технической литературой, вести патентный поиск с оформлением заявок на предлагаемые технические решения, оформлять отчеты и формулировать выводы по выполненным экспериментальным исследованиям.

Научно-исследовательская подготовка будущего инженера осуществляется в ходе изучения курсов «Основы экспериментальных исследований и методика их проведения», «Основы научных исследований», «Учебно-исследовательская работа студентов», «Научно-исследовательская работа студентов» и др. с выполнением исследовательских лабораторно-практических работ, проведения лабораторных работ исследовательского характера по другим изучаемым дисциплинам, написания обзоров состояния дел в различных областях машино- и приборостроения, выполнения курсовых проектов исследовательского направления по изучаемым дисциплинам. Этот этап научно-исследовательской подготовки, встроенный в учебный процесс, можно считать учебно-исследовательской работой студента. Параллельно с этим процессом и после его окончания студенту рекомендуется перейти к этапу активного участия в научно-исследовательской деятельности профилирующей кафедры, который можно назвать научно-исследовательской работой студента. На обоих этапах рекомендуется активное участие в студенческих научно-технических конференциях и семинарах, других научно-технических мероприятиях.

Установлено, что лишь конструкторскими решениями и подбором конструкционных материалов без использования прогрессивной технологии, обеспечивающей улучшение эксплуатационных свойств деталей и соединений, в большинстве случаев невозможно повысить технический уровень, качество и надежность изделий. Поэтому не только технолог, но и конструктор должен владеть технологическими знаниями и использовать их в создании изделий высокой технологичности.

Разнообразие технологических задач требует различных методов и способов их решения. Например, Д.Н. Гаркунов и его последователи для повышения надежности подвижных соединений (эффект безызносности) предложили применять в парах трения металлоплакирующие смазочные материалы. В.А. Белый и сотрудники для обеспечения надежности пар трения использовали покрытия из полимерных материалов. В.М. Смелянский, Д.Л. Юдин и другие исследователи решали проблему качества и надежности упрочнением подповерхностного слоя материалов деталей холодным пластическим деформированием, химико-термической, лазерной, другой обработкой, нанесением металлических покрытий. Однако во всех случаях первостепенную роль в поведении пар играет микрогеометрия рабочих поверхностей деталей. Она влияет также на удерживание смазок, в том числе и металлоплакирующих, адгезию и состояние слоя покрытий, поведение упрочненных деталей в условиях эксплуатации. Не случайно в последние десятилетия микрогеометрии рабочих поверхностей деталей уделяется пристальное внимание. На первом этапе исследовалась лишь шероховатость поверхностей, обеспечиваемая способами резания материалов и характеризующаяся хаотичным (нерегулярным) расположением микронеровностей, большим разбросом их высот, форм, шагов расположения. В этих условиях возможности управления микрогеометрией поверхностей и свойствами деталей оказались весьма ограниченными.

Новое начало в теории и практике технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей и соединений было положено в Советском Союзе Ю.Г. Шнейдером, В.А. Валетовым, автором настоящего пособия и другими исследователями путем развития теории микрогеометрии поверхности, разработки регулярных микро-рельефов (РМР) рабочих поверхностей деталей, создания способов

регуляризации микрогеометрии поверхностей, инструментов, приспособлений и оборудования [2, 3–11, 13, 15, 16, 20, 21, 22].

Разработка РМР по ГОСТ 24773–81 [7, 9, 20], создание необходимых для их реализации справочно-нормативных и руководящих технических материалов, оснастки и оборудования позволили в короткие сроки сделать результаты исследований достоянием производства, активизировать исследования по более широкому использованию поверхностного пластического деформирования (ППД), комбинированных и совмещенных процессов обработки на базе ППД, которые наряду с образованием РМР на рабочих поверхностях обеспечивают упрочнение подповерхностного слоя материалов деталей [4, 6, 8, 9, 11, 13, 16, 21].

Следует также отметить, что в современных сложных системах наиболее уязвимой является их механическая часть, отказы которой являются причиной выхода из строя всей системы и приводят к большим затратам на восстановление ее работоспособности. То же можно сказать и о надежности работы систем в экстремальных условиях (космос, океанские глубины, радиация, удаленность от ремонтных баз и т.п.).

За счет управления микрогеометрией рабочих поверхностей и рационализации состояния подповерхностного слоя материала удалось улучшить более 40 эксплуатационных свойств деталей и соединений, в том числе износостойкость, сопротивление задирам, схватыванию и коррозии, прочность деталей и неподвижных соединений, герметичность деталей, пневмо- и гидроплотность подвижных соединений, легкость сдвига и плавность перемещения деталей в соединениях, незагрязненность рабочих поверхностей и зазоров, адгезию покрытий и др. Экономический эффект в результате применения прогрессивной технологии, улучшения эксплуатационных свойств деталей и соединений, экономии материалов и других факторов только на ряде предприятий 20 отраслей исчисляется десятками миллионов рублей в ценах на 1.01.1991 года [7, 9, 20].

Следовательно, повышение качества и надежности машин, приборов, аппаратов путем улучшения эксплуатационных свойств деталей и соединений технологическими методами является актуальным и приоритетным направлением создания новой продукции и совершенствования машиностроительного производства.

Изложенный в пособии опыт проведения научно-исследовательских опытно-конструкторских работ (НИОКР) работниками заводов, преподавателями втузов с участием студентов позволит будущим инженерам в выполнении собственных экспериментов и исследований как в стенах учебного заведения, так и на промышленном предприятии, куда они прибудут после окончания учебы.

Приобщение к научным исследованиям путем участия в научно-исследовательской работе по одному из направлений одной из кафедр, выполнения исследовательских заданий в период прохождения практики, разработки курсовых исследовательских проектов, выступления с докладами на научно-технических конференциях и семинарах, опубликования статей позволит студенту повысить уровень своей научно-исследовательской подготовки. Наилучшим завершением деятельности студента в НИОКР в стенах втуза является выполнение дипломного проекта научно-исследовательского и опытно-конструкторского характера.

В первой главе пособия, написанной на базе ГОСТ 27.202–83, ГОСТ 24026–80, ГОСТ 16263–70 и источников [13, 14, 21] с использованием источников [1, 2, 9, 11, 16–19], систематизированно изложены основы научных исследований, приемлемые для всех технических специальностей университетов. Достаточно подробно изложены методы проведения и обеспечения технологических исследований с описанием средств измерения, которым в литературе уделено недостаточно внимания.

Ограниченность объема пособия не позволила рассмотреть все виды технологических исследований, но этот пробел в значительной мере восполнен второй главой пособия, созданной на базе источников [4–9] с использованием источников [1, 8, 11, 14, 15, 20, 21], в которой отражен более широкий перечень технологических исследований.

В третьей главе, созданной на базе источников [15, 23] с использованием некоторых источников из списка рекомендуемой литературы для расширения кругозора, творческого приобщения к научно-исследовательской деятельности и выбора своего направления научной деятельности, рассмотрены особенности наноструктурных материалов и их технологий, влияние размерных эффектов наноматериалов на эксплуатационные свойства деталей и инструмента, специфика применения исследовательских и технологиче-

ских средств в экспериментальной и производственной деятельности, использование наноматериалов и применение нанотехнологий в промышленности.

В четвертой главе, написанной на базе ГОСТ 7.23–2001 и источников [4, 9, 10] с использованием других источников, получили отражение вопросы организаций учебно-исследовательской и научно-исследовательской работы студентов, содержание работ исследовательского технологического и конструкторского направлений, включая курсовые и дипломный проекты.

С первых месяцев обучения студентам следует приобщаться к научно-исследовательской деятельности, контактировать с производством, изучать опыт экспериментально-научного решения проблем машино- и приборостроения. Во внеучебное время им должна быть предоставлена возможность участия в студенческих научно-исследовательских институтах, лабораториях, конструкторских проектных и других бюро, проблемных группах, кружках, доступ к научной и научно-технической информации и другие возможности для самостоятельного совершенствования своей общенаучной и профессиональной подготовки.

Технические науки являются весомой составляющей многогранного научного комплекса и представляют собой систему знаний о целенаправленном преобразовании природных тел и процессов в технические объекты и технологии, о методах конструктивно-технической и технологической деятельности, а также о способах функционирования технических объектов в системе производства. Деятельность в сфере технических наук предполагает высокий уровень теоретических и познавательных знаний, владение опытом и достижениями прошлых лет, проявление самостоятельности и интереса, преданность трудной, но почетной судьбе экспериментатора и исследователя путей развития научно-технического прогресса машино- и приборостроения. Плодотворная научно-исследовательская деятельность студентов в вузовский период является хорошим резервом для дальнейшего обучения на факультетах повышения квалификации и стажировках; в магистратуре, аспирантуре, докторантуре; пополнения научных кадров научно-исследовательских институтов и научно-производственных объединений.

По характеру выполнения исследования можно разделить на направления:

- теоретические исследования в области точности и микрогеометрии поверхностей, методов обработки материалов, технологии машино- и приборостроения;

- информационный поиск, обзоры и реферирование;

- инженерный эксперимент;

- разработка, монтаж и наладка лабораторных установок (устройств) и исследовательских стендов с последующим определением их метрологических, динамических, электрических, кинематических и других характеристик, составлением описания работы и паспорта оборудования;

- проектные работы исследовательского и опытно-конструкторского характера с созданием новой конструкции или модернизации существующего оборудования, приспособления, инструмента, испытательного устройства, средства автоматизации и т.п.;

- комплексные темы.

В своей научно-исследовательской деятельности студенту следует руководствоваться государственными стандартами, в их числе ГОСТ 24026–80 «Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения», ГОСТ 16263–70 «Метрология. Термины и основные понятия», ГОСТ 8.417–81 «Единицы величин», ГОСТ 27.202–83 «Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции», ГОСТ 7.23–2001 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления», ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики», ГОСТ 24773–81 «Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры, характеристики», ГОСТ 19698–74 «Рукопись авторская для издания», ГОСТ 3.1109–82 «Термины и определения основных понятий», ЕСКД, ЕСТД и др.; настоящим учебным пособием, научно-технической литературой по теме исследований.

В целях расширения творческого кругозора, более глубокого приобщения к научно-исследовательской деятельности и выбора конкретного направления научной деятельности прежде всего теми студентами, которые имеют намерение тесно связать свою жизнь с наукой, в пособии, помимо использованных литературных

источников, приведен список рекомендуемой литературы для расширения кругозора.

Автор уверен, что настоящее пособие будет полезным студентам и преподавательскому составу вузов и послужит улучшению организации учебно- и научно-исследовательской работы студентов, активизации самостоятельного проведения и оформления результатов экспериментальных исследований.

Все сказанное выше относится и к специалистам ремонтно-восстановительного производства. Ремонтные заготовки в виде изношенных деталей с наплавленными, приваренными, напыленными или другим способом восстановленными слоями требуют такой же черновой, получистовой и отделочной обработки с обеспечением заданной точности и микрогеометрии рабочих поверхностей, как и обычные заготовки.

Список основных условных обозначений

- АРИЗ — алгоритм решения изобретательских задач
- АСМ — атомно-силовой микроскоп
- БСГ — блок стабилизации глубины
- ВТП — вихретоковый преобразователь
- ГПФ — главная полезная функция
- ГТУ — гидравлическое тормозное устройство
- ДУРМР — двухуровневый регулярный микрорельеф
- ЕСКД — единая система конструкторской документации
- ЕСТД — единая система технологической документации
- ИПД — интенсивная пластическая деформация
- КМП — комплексный метод поиска технических решений
- КПД — коэффициент полезного действия
- КПП — коробка перемены передач
- КТС — компоненты технической системы
- ЛФВС — линейный формирователь видеосигналов
- МСТ — малогабаритный следящий трансформатор
- МНК — метод наименьших квадратов
- НИОКР — научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
- НТД — нормативно-техническая документация
- НЭ — нежелательный эффект
- ОСТ — отраслевой стандарт
- ОТК — отдел технического контроля
- ОУРМР — одноуровневый регулярный микрорельеф
- ОЭМ — обобщенный эвристический метод
- ПАВ — поверхностно-активные вещества
- ПМП — параметрический метод разрешения противоречий
- ПН — поднутренная неровность
- ППД — поверхностное пластическое деформирование
- ПФ — полезная функция
- ПФЭ — полный факторный эксперимент
- ПЭ — положительный эффект
- ПЭМ — просвечивающая электронная микроскопия
- ПРМР — полностью регулярный микрорельеф
- РМР — регулярный микрорельеф
- РПН — регулярная поднутренная неровность
- РСА — рентгеноструктурный анализ

- СВЧ — сверхвысокочастотный
- СЗМ — сканирующий зондовый микроскоп
- СОЖ — смазочно-охлаждающая жидкость
- СОТС — смазочно-охлаждающее техническое средство
- СТМ — сканирующий туннельный микроскоп
- ТО — термическая обработка
- ТС — техническая система
- ХТО — химико-термическая обработка
- ЧРМР — частично регулярный микрорельеф
- ЭВМ — электронная вычислительная машина
- ЭДС — электродвижущая сила
- ЭМ — электронный микроскоп



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Эксперимент и обработка его результатов



1.1.1. Разновидности эксперимента и понятия метрологии

Эксперимент — это научно поставленный опыт, наблюдение исследуемого явления в установленных условиях, позволяющих следить за ходом явления и неоднократно воспроизводить его при повторении этих условий. По сути эксперимент является основой научного познания, на котором основываются выводы науки. Лишь эксперимент позволяет подтвердить или опровергнуть научную версию.

По ГОСТ 24026–80 эксперимент трактуется как система операций, воздействий, наблюдений, направленных на получение информации об объекте исследования. Он включает в себя ряд опытов, в процессе которых происходит воспроизведение исследуемого явления в определенных условиях с обеспечением возможности регистрации результатов каждого опыта. Условия опытов задаются уровнями факторов, или значениями независимых переменных величин $x_1, x_2, \dots, x_k$, влияющих, по мнению экспериментатора, на объект исследования. По результатам опыта устанавливается значение отклика, или зависимой переменной y , по предположению зависящей от принятых факторов. В результате эксперимента опре-

деляется зависимость математического ожидания отклика от факторов — функция отклика, выражаемая соотношением

$$E\{y/\bar{x}\} = \eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) = f(\bar{x}, \bar{\theta}),$$

здесь $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ — параметры модели.

Функция отклика связывает между собой математическое ожидание отклика $E\{y/\bar{x}\} = \eta$, совокупность факторов, выраженную вектором $\bar{x}$, и совокупность параметров модели, определяемую вектором $\bar{\theta}$. Параметры модели до исследования неизвестны и подлежат определению из эксперимента. На функцию отклика могут переноситься определения, связанные с моделью, например линейная (по параметрам), полиномиальная, квадратическая и т.д.

Геометрическое представление функции отклика называется **поверхностью отклика**.

Возможны три группы технологических факторов:

□ группа 1 — факторы, характеризующие качество сырья, заготовок и не допускающие изменений в процессе исследования. Это, например, физико-механические (плотность, электропроводность, прочность, твердость, пластичность, структура материалов и др.) и технологические (припуски, точность размеров и отклонений формы и положения поверхностей и др.) характеристики заготовок на промежуточных операциях механической обработки;

□ группа 2 — управляемые факторы, с помощью которых реализуются заданные условия работы объекта: режимы обработки, точностные и прочностные характеристики оборудования и оснастки при обработке резанием и др. (факторы двух первых групп образуют совокупность контролируемых входных или независимых переменных процесса, учитываемых обычно при определении функции отклика);

□ группа 3 — неконтролируемые входные, или независимые, факторы, характеризующие действующие на объект возмущения, которые не могут быть измерены количественно в каждом опыте (неконтролируемые изменения химического состава материала заготовок и полуфабрикатов, колебания напряжения в электрической сети и температуры среды, изменения свойств оборудования и оснастки во времени и др.). Воздействие неконтролируемых факторов приводит к временному изменению (дрейфу во времени)

характеристик объекта (его выходных переменных, значений отклика).

По числу переменных эксперименты могут быть классифицированы на одно- и многофакторные: при однофакторных экспериментах изменению и регистрации подлежит один фактор (одна независимая переменная), при многофакторных — несколько факторов или независимых переменных.

Объекты исследований в экспериментах можно разделить на статистические и определяемые (детерминированные), управляемые и неуправляемые.

В статистических объектах отклик (случайная зависимая переменная y) находится в стохастической связи со случайными или неслучайными факторами $x_1, x_2, \dots, x_k$. Примером связи первого вида является зависимость характеристик качества готовых деталей от характеристик качества заготовок при их обработке, а связи второго вида — зависимость характеристик качества готовых деталей от режимов обработки заготовок. Стохастическая (непредсказуемая) связь проявляется в том, что изменение независимой величины приводит к изменению закона распределения зависимой случайной величины. Простейшим ее видом является корреляционная (взаимозависимая) связь, при которой с изменением независимой переменной изменяется математическое ожидание или среднее значение отклика.

Для детерминированных объектов характерны функциональные связи между неслучайными величинами, когда каждому значению аргумента соответствует строго определенное значение функции.

Управляемость объекта характеризуется возможностью воспроизведения на нем результатов опыта. В целях проверки этого свойства необходимо провести эксперимент при определенных (выбранных) уровнях принятых факторов, а затем повторить его несколько раз через разные промежутки времени и сравнить результаты. Воспроизводимость результатов оценивается разбросом их значений, который не должен превышать заранее заданного значения (требование к точности эксперимента). Только в этом случае можно считать, что объект удовлетворяет требованию воспроизводимости эксперимента по точности.

По способу выбора уровней факторов эксперименты делятся на активные и пассивные. В случае если уровни факторов в каждом опыте задаются экспериментатором, эксперимент относится к активным. Когда уровни факторов не задаются экспериментатором, а регистрируются им в каждом опыте, эксперимент причисляется к пассивным.

Экспериментальные исследования подразделяются также на качественные, когда устанавливается только факт наличия явления, количественные, лабораторные, промышленные и автоматизированные.

В экспериментальных исследованиях имеет место ряд осуществляемых друг за другом этапов, в числе их формулировка цели, обдумывание предположения (гипотезы) о поведении исследуемого объекта, планирование эксперимента, обработка результатов и их анализ, проверка правильности выдвинутого предположения (гипотезы), проверка условий окончания эксперимента, планирование очередного эксперимента. Таким образом, исследование состоит из повторяющихся циклов. По мере их выполнения объем знаний об объекте возрастает, а выдвигаемые гипотезы могут все более приближаться к истине.

Понятия метрологии, их термины и определения регламентируются ГОСТ 16263–70. Например, понятие «измерение» характеризуется таким определением: «Измерить какую-либо величину — значит узнать, сколько раз заключается в ней однородная с ней величина, принятая за единицу меры, установленной системой единиц» (ГОСТ 8.417–2002).

Для измерений различных величин используются специальные приборы и установки. Приборы подбираются в соответствии с необходимой точностью измерений и устанавливаются согласно рекомендациям по их нормальной технической эксплуатации. При этом должно быть исключено возможное влияние на работу установки различных внешних факторов (электромагнитных полей, тепловых воздействий, ударов, вибраций и т.п.). Затем выполняют ряд контрольных измерений, чтобы убедиться в том, что установка работает в режиме нормальной эксплуатации. С этой целью измеряют заранее известные характеристики эталонных элементов, амплитуды сигналов и т.д. Если требуется, проводят тарировку (градуировку) аппаратуры, т.е. определяют показания приборов,

соответствующие известным значениям измеряемого фактора. После этого приступают к выполнению запланированных измерений.

Непосредственный процесс измерения состоит из наблюдения и отсчета. Цель наблюдения — фиксация факта наступления какого-либо определенного события. События могут быть самыми разнообразными: иногда требуется совместить две риски, риску — с какой-либо частью измеряемого объекта, заметить момент, когда мениск, образуемый жидкостью в капилляре, становится плоским при изменении давления и т.д. После наступления ожидаемого события производится считывание показания прибора со шкалы лимба или цифрового табло.

Очевидно, что отсчет по шкале прибора и значение величины, которая измеряется, не одно и то же. Процесс измерения имеет смысл, если между ними существует определенная связь. Наличие такой связи характеризуется уравнением измерения. Уравнения измерения можно разделить на три группы: прямые, косвенные, совместные.

При прямом измерении соответствующее уравнение имеет вид:

$$y = Cx,$$

где y — значение измеряемой величины в принятых для нее единицах; C — цена деления шкалы или единичного показания цифрового табло, переводной коэффициент от единицы меры свойства эталонного элемента к значению измеряемой величины в ее единицах; x — отсчет по измерительному устройству (в делениях шкалы или по табло).

При прямых измерениях значение величины находится из опытных данных (измерение линейкой, штангенциркулем, углов — угломером и транспортиром; определение значения величины по шкале прибора, проградуированной в единицах измеряемой величины).

Косвенное измерение характеризуется уравнением

$$z = f(x, y, \dots; a, b, \dots),$$

где z — значение измеряемой величины в ее единицах; $x, y, \dots$ — результаты прямых измерений; $a, b, \dots$ — физические константы и переводные коэффициенты (постоянные) приборов.

Например, площадь S прямоугольника определяется косвенным путем по выражению $S = l_1 l_2$, где l_1 и l_2 — соответственно длина и ширина прямоугольника, определяемые прямым измерением.

При совместных измерениях (их еще называют совокупными) одновременно подвергаются измерению две или несколько разных величин, уравнения измерения которых образуют систему линейно независимых уравнений. При двух измеряемых величинах уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} f_1(\alpha, \beta, x_1, y_1, \dots; a_1, b_1, \dots) &= 0; \\ f_2(\alpha, \beta, x_2, y_2, \dots; a_2, b_2, \dots) &= 0, \end{aligned} \right\}$$

где α, β — измеряемые величины; $x_1, y_1, \dots$ — показатели прямых или косвенных измерений; $a_1, b_1, \dots$ — физические константы или постоянные приборов.

По уравнению прямой $y = \alpha + \beta x$, например, можно одновременно определить тангенс угла β ее наклона к оси абсцисс и значения ординаты α при нулевом значении абсциссы ($x = 0$).

При превышении количества уравнений над числом неизвестных (в случае многих опытов) возникает система условных уравнений, которую можно решить методом наименьших квадратов.

Измерения, при которых число опытов и число уравнений измерений равны, называются однократными, в случае если число опытов и число уравнений измерения превышают число измеряемых величин — многократными. Измерения могут проводиться многократно, когда необходимо уменьшить случайную ошибку измерений.

В зависимости от точности результатов можно выделить три класса измерений: 1 — эталонные, результат которых должен иметь максимально возможную точность при достигнутом уровне техники и науки (измерения физических констант — скорости света, заряда электрона и т.д.); 2 — контрольно-проверочные, при которых ошибка результата не превышает заранее заданного допуска. Такие измерения выполняются в проверочных или контрольно-измерительных лабораториях при поверке приборов; 3 — технические, ошибка результатов которых определяется характеристиками измерительного комплекса.

Измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин или использовании значений физических констант и функциональных зависимостей, называется *абсолютным*. Размерность результата абсолютных измерений та же,

что и измеряемой величины (например, измерение плотности тела $\rho = m/V$, где m — масса, V — объем тела).

Относительным называется измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы. Такое сравнение позволяет установить, во сколько раз (k) одна величина больше другой. Уравнение относительных измерений:

$$y = kx.$$

Примеры относительных измерений: измерение массы тела на весах; длины различного рода — линейками, микрометрами, штангенциркулями; разности потенциалов — вольтметрами; силы тока — амперметрами и т.д.

В случае относительных измерений используются приборы, которые предварительно калибруются с помощью эталона единицы соответствующей величины. Таким образом, чтобы были возможны относительные измерения некоторых величин, необходимо создать эталоны единиц этих величин и с их помощью производить калибровку приборов.

1.1.2. Ошибки измерений, методы их оценки, учета и исключения

Ввиду влияния различных факторов в результатах измерений появляются ошибки, которые накладываются на измеряемые значения величин так, что они представляют собой сумму истинного значения величин и ошибок. Ошибку Δx можно выразить как разность между результатом измерения x и истинным значением μ измеряемой величины:

$$\Delta x = x - \mu.$$

Так выражается абсолютная ошибка. Для оценки точности измерения необходимо сопоставить значение абсолютной ошибки и самой измеряемой величины. Относительная ошибка ϵ выражается их отношением в процентах:

$$\epsilon = \Delta x_{\text{отн}} = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100.$$

Ошибки измерения подразделяются на систематические, случайные и грубые (промахи).

Систематическая ошибка остается постоянной на протяжении одной серии измерений или изменяется по какому-либо известному закону. Измененное значение измеряемой величины в этом случае должно быть откорректировано и приведено к фактическому путем прибавления или отнимания известной ошибки. Допустим, масса гири отличается от эталона на $+0,2$ г. Значит, к измеренному значению массы тела надо прибавить $0,2$ г и получить фактическое значение массы.

Систематические ошибки, в свою очередь, классифицируются по их источникам и свойствам. Источниками систематических погрешностей могут быть метод измерения, средства измерений и экспериментатор, соответственно принято различать методические, инструментальные и личные погрешности. По свойствам систематические погрешности делятся на постоянные и закономерно изменяющиеся. Последние в свою очередь подразделяются на прогрессирующие, периодические и изменяющиеся по сложному закону.

Прогрессирующие погрешности — это погрешности, монотонно возрастающие или убывающие в процессе измерений. Например, такие погрешности вызывает изменение рабочего тока потенциометра из-за падения напряжения на клеммах питающего его аккумулятора. *Периодические погрешности* — погрешности, изменяющиеся с определенным периодом.

Случайная ошибка ψ изменяется при каждом измерении различным образом как в положительную, так и в отрицательную сторону. Оценка случайных ошибок, возникающих в результате воздействия различных случайных факторов, может осуществляться путем использования теории вероятностей и математической статистики. При увеличении числа измерений случайная ошибка эксперимента уменьшается.

Грубая ошибка (промах) может быть обусловлена недостаточным вниманием экспериментатора при измерении и записи результата, сбоем системы измерения.

В тех случаях, когда измеряются какие-либо показатели готовой продукции (диаметр детали, состав и свойства материала и т.п.), задача измерений обычно состоит не в получении точного значения измеряемой величины, а в необходимости установить, укладывается ли значение величины, по которой оценивается это свойство,

в определенное поле допуска, установленное для данной продукции. Если это не достигается, изделия являются браком.

Следствием ошибок измерений могут быть два обстоятельства:

□ хорошее изделие бракуется (такая ошибка называется ошибкой первого рода);

□ брак пропускается (ошибка второго рода).

Например, диаметр отверстия по чертежу равен 60 мм с допуском $+0,013$ мм. При измерении диаметра получено значение 60,012 мм. Ошибка измерительного устройства 0,002 мм. С учетом погрешности измерительного устройства действительный диаметр может составлять 60,014 мм. Признавая отверстие годным, можно совершить ошибку второго рода. Если при той же точности измерений оказалось, что диаметр равен 60,014 мм, деталь бракуется, хотя в действительности размеры отверстия могут находиться внутри поля допуска (скажем, составлять 60,012 мм). В этом случае была бы сделана ошибка первого рода. Очевидно, что когда размеры изделия находятся вблизи границ поля допуска, всегда есть вероятность сделать ошибку первого или второго рода.

На первый взгляд, наиболее опасна ошибка второго рода — пропуск брака. Это действительно так, когда дело происходит с очень ответственными изделиями (например, в оружейном производстве, системах самонаведения противолодочных торпед, медицинской технике и т.п.). Здесь лучше забраковать десять изделий, чем пропустить одно бракованное. Выбор экономически и технически целесообразной системы измерений и бракования во всех случаях очень важен.

Случайные погрешности, в отличие от систематических, исключить невозможно и лишь методами теории вероятностей и математической статистики можно учесть их влияние при определении истинного (фактического) значения измеряемой величины. Эти погрешности результатов измерения можно рассматривать как случайные величины.

Свойства случайной величины X описываются **функцией распределения** $F(x)$, которая определяет вероятность, что случайная величина X будет меньше x :

$$F(x) = P\{X < x\}.$$

Наряду с интегральной функцией $F(x)$, используется дифференциальная функция, называемая **плотностью распределения**:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

Функции распределения (в точных измерениях чаще всего имеет место нормальное или равномерное распределение) являются полными характеристиками случайных величин, но для практического применения они не всегда пригодны. Поэтому при описании случайных величин применяются и их числовые характеристики — моменты случайных величин: начальные и центральные. Начальные m_k и центральные μ_k моменты k -го порядка определяются по формулам

$$m_k = M[X^k] = \int_{-\infty}^{\infty} x^k f(x) dx;$$

$$m_k = M[X^k] = \sum_{i=1}^n x_i^k p_i;$$

$$\mu_k = M[X - M(X)]^k = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M[X])^k f(x) dx;$$

$$\mu_k = M[X - M(X)]^k = \sum_{i=1}^n (x_i - M[X])^k p_i.$$

Здесь и ниже формулы, содержащие знак интеграла, относятся к непрерывным случайным величинам, а знак суммы — к дискретным.

Чаще используется начальный момент первого порядка ($k = 1$) — математическое ожидание случайной величины:

$$m_1 = M[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx; \tag{1.1}$$

$$m_1 = M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i.$$

Здесь p_i — относительная частота (частота) появления дискретной величины x_i в выборке. Предполагается, что $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ (т.е. рассматривается полная группа событий).

Из центральных моментов особенно важен момент второго порядка ($k = 2$) — дисперсия случайной величины:

$$\begin{aligned}\mu_2 = D[X] &= M[(X - m_1)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_1)^2 f(x) dx; \\ \mu_2 = D[X] &= M[(X - m_1)^2] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^2 p_i.\end{aligned}\quad (1.2)$$

Положительный корень квадратный из дисперсии

$$S = \sqrt{D[X]}$$

носит название **среднего квадратического отклонения** случайной величины.

Значение S , характеризующее разброс случайных величин относительно их математического ожидания, наиболее часто используется для оценки случайной ошибки измерения.

Формулы (1.1) и (1.2) пригодны для оценки величин $M[X]$ и $D[X]$ генеральной совокупности, т.е. множества всех рассматриваемых единиц.

При измерениях обычно имеют дело с конечным подмножеством генеральной совокупности ($n = 1...30$), которое называют **выборкой**. Выборочные значения $M[X]$ и $D[X]$, обозначаемые обычно $\bar{x}$ (среднее арифметическое значение) и дисперсию S^2 , рассчитывают по формулам

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \\ S^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}.\end{aligned}\quad (1.3)$$

Если $n > 30$, то

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (1.4)$$

где n — число измерений, или объем выборки; $S = \sqrt{S^2}$ — среднее квадратическое отклонение.

Для оценки случайных ошибок измерений используют коэффициент вариации ω и среднюю арифметическую ошибку r_n (табл. 1.2):

$$\omega = \frac{S}{\bar{x}}; \quad r_n = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|}{n}.$$

При достаточно большом числе наблюдений (практически при $n > 30$) имеют место соотношения: $S = 1,25r_n$, или $r_n = 0,8S$.

По значениям S и $\bar{x}$ можно проверить, принадлежат ли резко выделяющиеся результаты измерений к данной генеральной совокупности или же они вызваны грубыми погрешностями и их следует отбросить. Для этого используется критерий Груббса. При этом определяется величина

$$\theta = \frac{|x^* - \bar{x}|}{S},$$

где x^* — наибольшее или наименьшее значение x_i в выборке.

Найденное значение θ сравнивается с критическим θ_k (табл. 1.1) [12]. Если при данном количестве измерений n имеет место соотношение $\theta > \theta_k$ при коэффициенте надежности α , то с надежностью α и вероятностью $P = 1 - \alpha$ можно считать «выскакивающее» значение грубой погрешностью и исключить его из дальнейшей обработки результатов. После этого знания $\bar{x}$ и S следует пересчитать.

Таблица 1.1

Критические значения θ_k

n	P			
	0,95	0,98	0,99	0,999
5	3,04	4,11	5,04	9,43
6	2,87	3,64	4,36	7,41
7	2,62	3,36	3,96	6,37
8	2,51	3,18	3,71	5,73
9	2,43	3,05	3,54	5,31
10	2,37	2,96	3,41	5,01
11	2,33	2,89	3,31	4,79
12	2,29	2,83	3,23	4,62

Окончание табл. 1.1

n	P			
	0,95	0,98	0,99	0,999
13	2,26	2,78	3,17	4,48
14	2,24	2,74	3,12	4,37
15	2,22	2,71	3,08	4,28
20	2,145	2,602	2,932	3,979
25	2,105	2,541	2,852	3,819
30	2,079	2,503	2,802	3,719
35	2,061	2,476	2,768	3,652
40	2,048	2,456	2,742	3,602
50	2,030	2,429	2,707	3,532
60	2,018	2,411	2,683	3,492
70	2,009	2,399	2,667	3,462
100	1,994	2,377	2,639	3,409
∞	1,960	2,326	2,576	3,291

Пример. Для $n = 40$ независимых равноточных измерений величины x имеем: $\bar{x} = 6,5$; $S = 0,1$; $(n + 1)$ -е измерение показало наибольшее значение x в выборке $x^* = 6,8$. Можно ли исключить этот результат из дальнейшей обработки?

Согласно табл. 1.1, $\theta_k = 2,742$ при $n = 40$ и $P = 0,99$. Тогда

$$\theta = \frac{|x^* - \bar{x}|}{S} = \frac{6,8 - 6,5}{0,1} = 3.$$

Поскольку $\theta > \theta_k$, то замер $x^* = 6,8$ следует считать грубой погрешностью и его следует исключить из дальнейшей обработки.

При измерениях одной из основных является задача учета и исключения систематических ошибок, которые могут существенно исказить результаты измерений. Систематические ошибки по характеру их проявления можно подразделить на четыре группы [13]:

1. Ошибки, природа которых известна, а величина достаточно точно может быть определена. Они могут быть устранены введением соответствующих поправок. Здесь необходимо источники таких ошибок тщательно анализировать, точно определять поправки и учитывать их в окончательном варианте. Но требуется разумный

подход. Если, например, поправка на порядок (в 10 раз и более) меньше точности измерений, то учитывать ее просто нет смысла.

Значение учитываемых поправок устанавливается в зависимости от значений других ошибок, сопровождающих измерение. Обычно принимают, что если поправка не превышает 0,005 от средней квадратической S ошибки результата измерений, то ею следует пренебречь.

2. Ошибки известного происхождения, но неизвестного значения. К их числу относится погрешность измерительных приборов, которая иногда определяется классом точности прибора. Например, электроизмерительные приборы характеризуются обычно классом точности в пределах от 0,05 до 4.

Если на приборе указан класс точности 0,5, то это значит, что показания прибора правильны с точностью до $\pm 0,5\%$ от всего диапазона измерений по шкале прибора. Так, вольтметр, имеющий шкалу с градуировкой до 150 В, класс точности 0,5, дает абсолютную основную погрешность не более $\pm 0,75$ В.

Максимальные погрешности измерительных линеек, микрометров и некоторых других измерительных средств иногда указываются на самом приборе или в его паспорте. При отсутствии таких указаний точность измерений может приниматься равной 0,2 цены деления шкалы.

Систематические ошибки описанного типа не могут исключаться. Если при измерении напряжения описанным вольтметром получено $U = 65,3 \pm 0,75$, то это значит, что действительное значение напряжения находится в пределах 64,55...66,05 В.

3. Неявные ошибки, существование которых часто и не подозревается, могут быть весьма значительными и опасными. Так, например, при определении плотности какого-либо металла измерением объема и массы образца можно получить грубую ошибку, если образец имеет раковины с пузырьками газа, образовавшиеся при отливке. Выходом в этом случае является измерение значений таких величин несколькими методами в разных условиях. Совпадение полученных результатов является определенной гарантией правильности измерений.

4. Ошибки, обусловленные свойствами объекта и не связанные непосредственно с измерительными операциями. Считающийся круглым цилиндр имеет в сечении форму эллипса (овала).

Диаметры, измеренные вдоль большой и малой осей эллипса, имеют разные значения. В случае измерения диаметра один раз без учета овальности цилиндра вычисленная площадь его сечения будет содержать систематическую ошибку. Наилучшим образом действительный диаметр цилиндра будет характеризовать его среднее значение, полученное по результатам ряда замеров в различных плоскостях.

Из многих специальных методов устранения систематических ошибок [16] целесообразно рассмотреть два метода: двойного измерения и компенсации.

Метод двойного измерения применяется при проведении экспериментов с помощью устройств, имеющих симметричную структуру (например, весов). Этот метод состоит в том, что проводятся два измерения, при которых роли левой и правой частей установки последовательно меняются.

Метод компенсации предполагает проведение измерений два раза таким образом, чтобы ошибка вошла в результаты один раз с одним знаком, а другой раз — с другим. Этот метод должен применяться, например, при работах с термопарами для исключения паразитных термотоков.

Простейшим, но частным случаем прогрессирующей погрешности является погрешность, изменяющаяся по линейному закону, например во времени. Для предупреждения такой погрешности можно использовать два наблюдения, выполненных с фиксацией времени.

Если результаты наблюдений E_1 и E_2 удовлетворяют зависимости:

$$E_1 = x + Kt_1, \quad E_2 = x + Kt_2,$$

где x — истинное значение измеряемой величины; K — коэффициент пропорциональности, учитывающий изменение погрешности измерения во времени; t_1 , t_2 — моменты времени выполнения наблюдений, то

$$x = \frac{E_1 t_2 - E_2 t_1}{t_2 - t_1}.$$

Даже если учтены все систематические ошибки, в результатах измерений все же возможны случайные ошибки, правила вычис-

ления которых будут рассмотрены ниже. Если случайная ошибка принятого метода измерений известна заранее и является определяющей, т.е. существенно больше (в 3 и более раз) систематической ошибки, измерение следует производить несколько раз. В качестве оценки исследуемой величины принимают обычно среднее арифметическое результатов ряда измерений. Случайная ошибка этого среднего будет меньше, чем ошибка единичного измерения. Если же определяющей является систематическая ошибка, измерение достаточно выполнить один раз.

1.1.3. Оценка истинного значения величины при ее прямых и косвенных измерениях

Оценки величины при прямых и косвенных измерениях имеют определенные отличия и особенности [12]. Оценить значение при прямых измерениях — это значит:

□ для результатов n независимых измерений величины A указать функцию $q(x_1, x_2, \dots, x_n)$, которая дает достаточно хорошее приближение к значению A ; такая функция называется **точечной оценкой** и определяется одним числом;

□ указать границы интервала $(\hat{\theta} - \epsilon; \hat{\theta} + \epsilon)$, который с заданной вероятностью P покрывает значение A ; такая оценка носит название **доверительной** или **интервальной**.

Наиболее распространенный в практике случай, когда в целях уменьшения влияния случайных погрешностей осуществляются равноточные многократные измерения исследуемых величин. Результат каждого измерения x_i отличается от истинного значения величины A вследствие погрешности, в которой можно выделить случайную ψ_i и систематическую ϑ_i составляющие, т.е.

$$x'_i = A + \psi_i + \vartheta_i.$$

Информацию о случайной составляющей дают повторные наблюдения. Чтобы оценить систематическую составляющую, необходимо учесть свойства и характеристики средств измерения, методику и условия измерения.

Математически обоснованное решение задачи по определению оценки $A = f(x'_i)$ можно найти по виду распределения значений x'_i . При нормальном распределении погрешностей и результатов наблю-

дений оптимальной оценкой центра распределения A является среднее арифметическое результатов наблюдений.

При постоянных систематических погрешностях ($\vartheta_i = \vartheta_0$) вначале определяется среднее арифметическое результатов наблюдений, а затем оно уточняется с помощью поправки $C = -\vartheta_0$:

$$\tilde{A} = \frac{\sum_{i=1}^n x'_i}{n} + C, \quad (1.5)$$

здесь $\tilde{A}$ — точечная оценка истинного значения A .

Точечные оценки всегда приблизительны, поскольку их получают из отдельной выборки результатов измерений. Поэтому необходимо найти доверительный интервал для $\tilde{A}$, внутри которого с определенной вероятностью $P = 1 - \alpha$ находится значение A . Уровень α значимости критерия при оценке достоверности значений величин, выраженный в процентах, показывает, сколько раз в ста испытаниях исследователь рискует ошибиться, объявив изучаемое событие неслучайным. Обычно $\alpha = 0,01; 0,02; 0,05$.

Уровню значимости α соответствует доверительная вероятность $1 - \alpha = P$. С вероятностью P выполняется неравенство $\hat{\theta} - \varepsilon < \theta < \hat{\theta} + \varepsilon$, где $\hat{\theta}$ — точечная оценка неизвестного параметра θ ; ε — характеризует точность оценки.

Если $1 - \alpha$ означает вероятность того, что результат измерений $\tilde{A}$ отличается от истинного значения A не более чем на Δ , то

$$P(\tilde{A} - \Delta < A < \tilde{A} + \Delta) = 1 - \alpha, \quad (1.6)$$

$$\Delta = t_{n\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (1.7)$$

где $t_{n\alpha}$ — коэффициент (критерий) Стьюдента, который зависит от значений α и $n - 1$ (табл. 1.2) [12, 21]; n — число измерений.

Оценка (1.6) называется доверительной или интервальной. Зависимость (1.7) записывают также в виде

$$\Delta = t_{\alpha, n-1} S_{\bar{x}},$$

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (1.8)$$

Из формулы (1.8) видно, что величина $S_{\bar{x}}$ в $\sqrt{n}$ раз меньше величины S для i -го измерения в выборке. Таким образом, если необходимо, например, в 2 раза уменьшить значение S случайной ошибки измерений, нужно выполнить 4 измерения и в качестве оценки измеряемой величины принять среднее арифметическое результатов этих измерений.

Таблица 1.2

Значение критерия Стьюдента $t_{n\alpha}$

n	$P = 1 - \alpha$			
	0,900	0,950	0,990	0,999
1	6,314	12,706	63,657	636,622
2	2,920	4,303	9,925	31,598
3	2,353	3,182	5,841	12,941
4	2,132	2,776	4,604	8,610
5	2,015	2,571	4,032	6,849
6	1,943	2,447	3,707	5,959
7	1,895	2,365	3,449	5,405
8	1,860	2,306	3,355	5,041
9	1,833	2,262	3,260	4,781
10	1,812	2,228	3,169	4,587
11	1,796	2,201	3,106	4,437
12	1,782	2,179	3,055	4,318
13	1,771	2,160	3,012	4,221
14	1,761	2,145	2,977	4,140
15	1,753	2,131	2,947	4,073
16	1,746	2,120	2,921	4,015
17	1,740	2,110	2,878	3,965
18	1,734	2,101	2,878	3,922
19	1,729	2,093	2,861	3,883
20	1,725	2,086	2,845	3,850
21	1,721	2,080	2,831	3,819
22	1,717	2,074	2,819	3,792
23	1,714	2,069	2,807	3,767
24	1,711	2,064	2,797	3,745
25	1,708	2,060	2,787	3,725
26	1,706	2,056	2,779	3,707

Окончание табл. 1.2

n	$P = 1 - \alpha$			
	0,900	0,950	0,990	0,999
27	1,703	2,052	2,771	3,690
28	1,701	2,048	2,763	3,674
29	1,699	2,045	2,756	3,659
30	1,697	2,042	2,750	3,646
40	1,684	2,021	2,704	3,551
60	1,671	2,000	2,660	3,460
100	1,658	1,980	2,617	3,373
∞	1,6448	1,9600	2,5758	3,2905

Выше описана схема раздельного учета влияния систематических и случайных ошибок на результат наблюдения: влияние случайной ошибки — в интервальной оценке (1.6), систематической — в точечной оценке (1.5). Но возможно суммирование систематических и случайных ошибок и учет этой суммарной ошибки в интервальной оценке (1.6). Это обусловлено тем, что систематические и случайные ошибки, хотя и имеют разную природу, проявляются совместно.

Полная величина случайной ошибки выявляется сразу в результате многократных наблюдений. При оценке систематической ошибки различными описанными выше методами определяют вначале предельные значения θ_j ее различных составляющих. В качестве основных составляющих обычно рассматриваются систематические ошибки прибора, округления, субъективные, методические. Если принять, что эти погрешности имеют равномерное распределение, то доверительные границы систематической погрешности результата измерения можно найти по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{j=1}^m \theta_j^2}, \quad (1.9)$$

где k — поправочный коэффициент; m — число элементарных систематических погрешностей.

Значение k зависит от доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$ и числа слагаемых m . При $P \leq 0,99$ величина k мало зависит от величины m (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Значения поправочного коэффициента k при доверительной вероятности $P \leq 0,99$ [16]

P	0,90	0,95	0,98	0,99
k	0,95	1,1	1,3	1,4

При малом числе слагаемых, т.е. когда $m \leq 4$, может оказаться, что вычисленное по формуле (1.9) значение θ превышает арифметическую сумму θ_j , что невозможно. В этом случае в качестве θ принимают $\sum_{j=1}^m \theta_j$.

Если найденные значения θ и Δ сопоставимы, т.е. не отличаются более чем на порядок, то определяется граница общей погрешности. Для этого часто используют формулу

$$\Delta_{\Sigma} = \theta + t_{\alpha, n-1} S_{\bar{x}}. \quad (1.10)$$

Зависимость (1.10) проста, но дает заведомо завышенную оценку. Более точную оценку Δ_{Σ} можно найти по формуле [16]

$$\Delta_{\Sigma} = t_{\Sigma} S_{\Sigma},$$

$$t_{\Sigma} = \frac{\Delta + \theta}{S_{\bar{x}} + S_v}; \quad S_v = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{j=1}^m \theta_j^2}; \quad S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\bar{x}}^2 + S_v^2}.$$

Значения Δ и θ необходимо определять при одном и том же значении α . Результаты измерений в этом случае можно записать таким образом:

$$A = \bar{A}' \pm \Delta_{\Sigma}; \quad \text{вероятность} \quad P = 1 - \alpha,$$

где значение $\bar{A}'$ находится из ряда результатов наблюдений x'_i . Если Δ или θ несут существенны, то вместо Δ_{Σ} записывается существенная величина.

В случае косвенных измерений при вычислении среднеарифметического значения можно использовать два способа [12]. Пусть, например, $y = f(x)$, тогда при наличии значений x_i :

□ вычисляется значение

$$\bar{x}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Путем подстановки этого значения в уравнении $y = f(x)$ получается зависимость $\bar{y} = f(\bar{x}_0)$;

□ для каждого из значений x_i вычисляется величина $y_i = f(x_i)$, а затем определяется

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}_i}{n},$$

где n — число прямых измерений.

Таким образом, при косвенных измерениях искомое значение величины определяется по уравнению, в которое входят результаты прямых измерений:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n). \quad (1.11)$$

По виду функциональной зависимости (1.11) различают линейные и нелинейные косвенные измерения. В случае линейных косвенных измерений справедлива зависимость

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_j, \dots, \bar{x}_n). \quad (1.12)$$

Расчет оценки результата косвенных измерений $\bar{y}$ можно осуществить описанными выше способами: первым (1.11) или вторым (1.12). Соответственно двумя описанными способами вычисляется и погрешность оценки величины y .

Дисперсия функции (1.11) случайных независимых аргументов выражается формулой

$$D(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 D(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 D(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 D(x_n). \quad (1.13)$$

По этой формуле можно найти и среднее квадратическое отклонение случайных и систематических погрешностей измерения y , подставляя в нее соответствующие значения по результатам прямых измерений. Суммарная погрешность косвенного измерения

$$S_{y\Sigma} = \sqrt{S_y^2 + S_{yv}^2}, \quad (1.14)$$

где S_y характеризует случайную составляющую ошибки косвенного измерения, S_{yv} — неисключаемую систематическую его составляющую.

Для случая (1.12) вычисляется ряд значений y_j и по формулам (1.3) или (1.4) находят S_y .

Если погрешности измерений малы по сравнению с измеряемым значением величины (это условие положено в основу всех формул), то оба способа дают одинаковые результаты. Однако в силу меньшей трудоемкости вычислений и больших возможностей первый способ предпочтительней (он позволяет определять и величину S_y , и величину $S_{y\nu}$).

Если значения S_y и $S_{y\nu}$ соизмеримы, доверительный интервал для оценки результата косвенного измерения рассчитывается по $S_{y\Sigma}$ [12]:

$$\Delta = \frac{t_{\alpha, n-1} S_{y\Sigma}}{\sqrt{n}}. \quad (1.15)$$

Если одно из значений S_y или $S_{y\nu}$ на порядок больше другого, его и подставляют в формулу (1.15). Окончательные результаты измерения записывают так: $y = \bar{y} \pm \Delta$, вероятность $P = 1 - \alpha$.

При нелинейных косвенных измерениях формулы (1.12)–(1.14) правомерно использовать лишь в том случае, если функцию (1.11) можно разложить в ряд Тейлора в окрестностях точки $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ и ограничиться линейным членом разложения. Использование линейного разложения справедливо, когда остаточный член разложения существенно меньше линейного. Различные методы проверки этого условия приведены в работе [16]. В случае его соблюдения доверительный интервал для величины $\bar{y}$ определяется по формуле (1.13), так как при малом числе измерений он имеет тот же физический смысл, что и величина $\sigma_{\bar{y}}$ при большом числе измерений [12]. Значения $D(x_1), D(x_2), \dots, D(x_n)$ в формуле (1.13) представляют собой дисперсии при измерении величин $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Пример вычисления доверительного интервала при косвенных измерениях [12]. Предполагается, что при изучении движения тела получена следующая зависимость величины пути L от времени t :

$$L = v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad (1.16)$$

где v_0 — скорость, $v_0 = 12$ м/с; a — ускорение, $a = 2,5$ м/с²; t — время, $t = 30$ с.

Доверительные оценки величин v_0 , a , t имеют значения: $\Delta_{v_0} = 1$ м/с, $\Delta_a = 0,2$ м/с², $\Delta_t = 2$ с. Для оценки погрешности Δ_L при определении пути L можно воспользоваться формулой (1.13) с учетом приближения Δ^2 к D . Тогда

$$\Delta_L = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial v_0} \Delta_{v_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial a} \Delta_a\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial t} \Delta_t\right)^2}. \quad (1.17)$$

Результат подстановки в формулу (1.17) выражения (1.16):

$$\Delta_L = \sqrt{(t \Delta_{v_0})^2 + \left(\frac{t^2}{2} \Delta_a\right)^2 + [(v_0 + at) \Delta_t]^2}. \quad (1.18)$$

Подстановкой в формулу (1.18) известных значений определяется значение Δ_L в метрах:

$$\Delta_L = \sqrt{(30 \cdot 1)^2 + \left(\frac{30^2}{2} \cdot 0,2\right)^2 + [(12 + 2,5 \cdot 30) \cdot 2]^2} = 198.$$

Среднее значение пути $\bar{L} = 12 \cdot 30 + 2,5 \cdot 30^2/2 = 1485$ м. Таким образом, окончательно получается результат $L = \bar{L} \pm \Delta_L = (1485 \pm 198)$ м, надежность которого является неизвестной.

1.1.4. Выбор средств измерений и числа наблюдений с учетом ошибок измерений

Выбор средств и числа наблюдений связан с вопросом организации исследований и учетом ошибок измерений. Точность измерений при выполнении экспериментального исследования в преобладающей степени определяет глубину проникновения в природу изучаемого явления.

Поскольку конкретных рекомендаций по выбору точности средств измерений не существует, часто стараются произвести измерения с наибольшей точностью. Но чем точнее измерения, тем труднее их осуществить. Поэтому не надо стремиться производить измерения с более высокой точностью, чем точность, необходимая для решения задачи.

При статистических исследованиях точности и стабильности обработки измерять размеры деталей и заготовок следует с помощью такого устройства, погрешность которого составляет 0,2 допуска

на контролируемый размер. Выбор средств измерений должен осуществляться в соответствии с ГОСТ 8.401–80 «Классы точности, средства измерений. Общие требования».

Выбор необходимого числа n измерений можно осуществлять исходя из зависимости (1.18), причем случайную ошибку желательно уменьшать лишь до тех пор, пока общая погрешность измерений не будет полностью определяться систематической ошибкой. При этом доверительный интервал Δ для истинного значения величины от случайных ошибок должен быть существенно меньше доверительного интервала θ от неучтенных систематических погрешностей, т.е. $\Delta \ll \theta$. Это условие можно считать выполненным, когда $\Delta < 0,1\theta$ или даже $\Delta < \theta/3$. С учетом зависимости (1.18) величину n можно определить по выражению

$$n = \frac{t_{n\alpha}^2 S^2}{\Delta^2}. \quad (1.19)$$

Использование выражения (1.19) затруднено, так как нужно заранее знать значение S , выявляемое лишь на базе результатов исследований. Поэтому можно пользоваться относительными показателями точности измерений. На базе формулы (1.19), по мнению А.М. Зайделя, величину n можно определять в зависимости от $\epsilon = \Delta/S$ и доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$.

Есть и другой путь — преобразование формулы (1.19). Пусть

$$\Delta = kx, \quad S = \omega\bar{x},$$

где k — заданный коэффициент, показывающий долю предельной ошибки от среднего арифметического значения величины $\bar{x}$; ω — коэффициент вариации.

Тогда

$$n = \frac{t_{n\alpha}\omega^2}{k^2}.$$

По последней формуле можно определить число n наблюдений независимо от размерности того или иного объекта измерений. Значение k определяется из практических соображений. Например, для испытания стойкости режущего инструмента целесообразно принимать среднее значение $k = 0,2$. При уменьшении значения k существенно возрастает объем испытаний. Значениями

также можно задаваться по опытным данным подобных испытаний. Например, выбор значений при стойкостных испытаниях инструмента можно осуществлять в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [1].



1.2. Корреляционные связи и зависимости

1.2.1. Понятие о корреляционных связях, задачи и предпосылки

Во многих задачах требуется установить и оценить зависимость исследуемой случайной величины y от одной x или нескольких $x_1, x_2, \dots, x_m$ величин. Случайные величины могут быть независимыми или связанными статистической зависимостью.

Статистической называется такая зависимость, при которой изменение одной величины приводит к изменению распределения другой. Кроме того, при изменении одной из величин изменяется среднее значение другой. В этом случае статистическая зависимость называется **корреляционной** (взаимосвязанной). Между двумя случайными величинами существует корреляционная зависимость, если каждому значению одной из них соответствует неопределенное количество значений другой, но средние этих значений зависят от значения первой величины. Однозначную функциональную зависимость между величинами x и y можно считать частным случаем корреляционной зависимости.

Корреляционный анализ изучает усредненный закон поведения каждой случайной величины в зависимости от значения другой, а также меру зависимости (тесноту связи) между рассматриваемыми величинами, другими словами, меру близости корреляционной зависимости к функциональной.

Для экспериментов технологического характера характерны статистические объекты исследований, в которых имеют место стохастические или корреляционные взаимосвязи между зависимыми и независимыми переменными. Найти математическое описание этих взаимосвязей — значит получить математическую модель объекта. В задачу корреляционно-регрессионного анализа входит

получение на основе экспериментальных данных математической модели объекта (процесса) и ее анализ. Ценность математической модели заключается в том, что с ее помощью можно решать задачи оптимизации процесса и предсказания результатов при изменении условий его протекания.

Методы корреляционно-регрессионного анализа применимы только для таких параметров, которые при изучении физической природы объекта являются взаимосвязанными. На первом этапе применения этих методов обычно оценивают степень тесноты взаимосвязи значений функции отклика с одной или несколькими независимыми переменными. В первом случае используется коэффициент парной корреляции r_{yx} , во втором — коэффициент множественной корреляции $R_{y \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_m}$.

Коэффициент парной корреляции

$$r_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{n S_y S_x},$$

где $\bar{y}$, $\bar{x}$ — средние арифметические значения y_i и x_i в рассматриваемой выборке; S_y , S_x — их средние квадратические отклонения; n — объем выборки, обычно $n = 50 \dots 200$.

Обозначим зависимую переменную цифрой 1, а независимые цифрами 2, 3, ..., m , тогда коэффициенты парной корреляции запишутся как r_{12} , r_{13} , ..., r_{1m} , r_{23} , r_{24} , ..., а коэффициент множественной корреляции с использованием метода определителей находится по формуле

$$R_{1,2,3,\dots,m} = \sqrt{1 - D/D_{11}},$$

где D — определитель, составленный из всех коэффициентов парной корреляции:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & \dots & r_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & \dots & 1 \end{vmatrix}.$$

D_{11} — определитель, образованный из определителя D исключением нулевого (первого слева) столбца и нулевой (верхней) строки:

$$D_{11} = \begin{vmatrix} 1 & r_{23} & \dots & r_{2m} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{3m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_{m2} & r_{m3} & \dots & 1 \end{vmatrix}.$$

В случае трех переменных

$$R_{1,2,3} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}}.$$

Значения r_{yx} и $R_{y.x_1, x_2, \dots, x_m}$ находятся в пределах от -1 до $+1$. Если они достоверны, т.е. существенно отличаются от нуля, значит, между исследуемыми факторами имеется линейная корреляционная зависимость. В противном случае эта зависимость отсутствует либо является существенно нелинейной. Если r_{yx} или $R_{y.x_1, x_2, \dots, x_m}$ равны $+1$ или -1 , что встречается очень редко, между исследуемыми факторами существует функциональная зависимость. Знаки r_{yx} и $R_{y.x_1, x_2, \dots, x_m}$ говорят о прямом (+) или обратном (−) характере взаимосвязей между исследуемыми факторами.

Для оценки степени тесноты нелинейных одно- и многофакторных взаимосвязей используются корреляционные отношения η .

Если корреляционным анализом подтверждено наличие взаимодействий между исследуемыми факторами, то на следующем этапе обработки экспериментальных данных с помощью регрессионного анализа выбирают математическую модель, описывающую указанные взаимосвязи. Уравнение, по которому могут быть найдены числовые значения выборочных средних функций отклика при соответствующих значениях независимых переменных, называется **уравнением регрессии**. В общем случае оно может быть выражено в виде

$$\bar{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_m).$$

Операция замены одной функции другой, в каком-то смысле эквивалентной, называется **аппроксимацией**. При аппроксимации неизвестных функций отклика в математической статистике наи-

более часто используются полиномиальные модели. Степени полиномов определяются максимальными степенями входящих в них переменных.

Полиномы для случая двух факторов:

□ нулевой степени

$$y = b_0; \quad (1.20)$$

□ первой степени

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2; \quad (1.21)$$

□ второй степени

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2; \quad (1.22)$$

□ третьей степени

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{112}x_1^2x_2 + b_{122}x_1x_2^2 + b_{111}x_1^3 + b_{222}x_2^3. \quad (1.23)$$

Уравнения регрессии (1.20) и (1.21) называются линейными, а вида (1.22) и (1.23) — нелинейными. Линейные уравнения регрессии целесообразно применять на первом этапе исследований нелинейных корреляционных связей для того, чтобы в дальнейшем внести в них необходимые поправки.

Полиномиальная модель с позиции статистики удобна, так как позволяет увеличивать степень точности аппроксимации путем повышения порядка полинома. Аппроксимирующая функция при этом остается линейной по параметрам. Это упрощает использование метода наименьших квадратов для оценки параметров, выбор оптимального расположения уровней факторов в области их изменения, использование статистических операций. При определении параметров уравнения регрессии все переменные и соотношения между ними иногда выгодно выражать в стандартизованном масштабе, где за начало отсчета всех переменных принимаются их средние значения, а за единицу масштаба — их же средние квадратические отклонения. В этом масштабе упрощаются соотношения между переменными, и это весьма удобно при анализе многомерных

связей. Значения переменных в стандартизованном масштабе t_{xi} вычисляются по формуле

$$t_{xi} = \frac{x_i - \bar{x}}{s_x},$$

где x_i — значения зависимых или независимых переменных в натуральном масштабе.

В случае использования в качестве модели процесса полинома первой степени и перевода переменных в стандартизованный масштаб упрощается формула расчета коэффициента множественной корреляции:

$$R_{1,2,3,\dots,m} = \sqrt{\beta_1 r_{12} + \beta_2 r_{13} + \dots + \beta_m r_{1m}},$$

где $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ — коэффициенты уравнения регрессии в стандартизованном масштабе.

Соответствие математической модели процесса экспериментальным данным называется *адекватностью*. Уравнение адекватно описывает результаты опытов, если квадратическое отклонение значений зависимой переменной y_{pi} , рассчитанных по уравнению регрессии, от экспериментальных данных y_i обусловлено только ошибкой воспроизведения, т.е. случайным характером этого параметра.

Использование корреляционно-регрессионного анализа оправдано и эффективно при выполнении следующих условий:

□ параметр оптимизации y является случайной величиной с нормальным законом распределения;

□ дисперсия S^2 величины y не зависит от абсолютных значений последней и остается постоянной или однородной при различных наблюдениях этой величины;

□ значения независимых переменных $x_1, x_2, \dots, x_m$ измеряются с пренебрежимо малыми ошибками в сравнении с ошибками в определении величины y ;

□ переменные $x_1, x_2, \dots, x_m$ линейно независимы;

□ процесс изменения зависимой переменной y является стационарным случайным;

□ экспериментальные данные получены из ряда независимых испытаний, наблюдений и образуют случайную выборку из данной генеральной совокупности.

Два последних условия характерны для пассивного эксперимента, остальные приемлемы как для пассивного, так и для активного эксперимента.

Ниже рассмотрены методы проверки соблюдения указанных предпосылок. Соответствие значений y нормальному закону распределения устанавливается либо по большим выборкам с помощью критериев Пирсона или Колмогорова [2, 17], либо на основании анализа природы величины y .

Для оценки однородности дисперсий величины y в условиях планирования эксперимента проводятся параллельные опыты в различных точках матрицы плана — при различных значениях $x_1, x_2, \dots, x_m$. Параллельные опыты служат для получения выборочной оценки дисперсии воспроизводимости результатов эксперимента. При пассивном эксперименте величина $S_{y_j}^2$ определяется по результатам отдельных выборок, взятых в примерно одинаковых условиях работы объекта. Если сравниваются два значения $S_{y_1}^2$ и $S_{y_2}^2$ при различных числах степеней их свободы $f(f = N - 1$, где N — число параллельных опытов или объем выборки), то используется критерий Фишера F_p , определяемый отношением большей дисперсии к меньшей:

$$F_p = \frac{S_{y_1}^2}{S_{y_2}^2} (S_{y_1}^2 > S_{y_2}^2).$$

Если наблюдаемое значение F_p меньше критического $F_{кр}$ для соответствующих чисел степеней свободы и принятого уровня значимости, то опыты считаются воспроизводимыми, а дисперсии однородными [2, 16].

Однородность ряда дисперсий при одинаковом числе опытов для определения каждой из них оценивают с помощью критерия Кохрена — отношения максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий ряда:

$$G_p = \frac{S_{y_{\max}}^2}{S_{y_1}^2 + S_{y_2}^2 + \dots + S_{y_N}^2} = \frac{S_{y_{\max}}^2}{\sum_{j=1}^N S_{y_j}^2}, \quad (1.24)$$

где N — число параллельных опытов или выборок (обычно $N = 2 \dots 5$).

Дисперсии однородны, если расчетное значение G_p не превышает критического $G_{кр}$ (табл. 1.4).

Таблица 1.4

**Критические значения критерия Кохрена $G_{кр}$
при доверительной вероятности $P = 0,95$**

n	$N - 1$							
	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0,9975	0,9393	0,9056	0,8772	0,8534	0,8332	0,8139	0,8010
3	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6771	0,6530	0,6333	0,6167
4	0,7679	0,6841	0,6278	0,5895	0,5598	0,5365	0,5175	0,5017
5	0,6838	0,5981	0,5441	0,5065	0,4763	0,4564	0,4387	0,4241
6	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184	0,3980	0,3817	0,3682
7	0,5612	0,4800	0,4307	0,3974	0,3726	0,3535	0,3384	0,3259
8	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362	0,3185	0,3043	0,2926
9	0,4775	0,4027	0,3584	0,3286	0,3067	0,2901	0,2768	0,2659
10	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029	0,2823	0,2660	0,2541	0,2439
12	0,3924	0,3264	0,2880	0,2624	0,2439	0,2299	0,2187	0,2098
15	0,3346	0,2759	0,2419	0,2195	0,2034	0,1911	0,1815	0,1736
20	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735	0,1602	0,1501	0,1422	0,1357

При неравном числе степеней свободы для каждой из дисперсий ряда их однородность проверяется с помощью критерия Бартлета. Вначале определяется средневзвешенная дисперсия

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N f_j S_{y_j}^2}{f}, \quad f = \sum_{j=1}^N f_j, \quad (1.25)$$

а затем вычисляются величины

$$B = 2,303 \left(f \lg S_y^2 - \sum_{j=1}^N f_j \lg S_{y_j}^2 \right); \quad (1.26)$$

$$C = 1 + \frac{1}{3(T-1)} \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{f_j} - \frac{1}{f} \right), \quad (1.27)$$

где $f_j = n_j - 1$; n_j — объем j -й выборки.

Установлено, что в случае, когда все величины $S_{y_j}^2$ соответствуют одной генеральной дисперсии, отношение B/C распределено приближенно, как критерий Пирсона χ^2 (табл. 1.5) с $N - 1 = f$ степенями свободы независимо от f_j , если все $f_j > 5$. Это значит [2, 17, 18], что при $\frac{B}{C} \ll \chi^2$, данном числе степеней свободы $N - 1$ и заданном уровне P дисперсии однородны. Очевидно, что $C > 1$. Поэтому вначале вычисляют B и сравнивают его с χ^2 . Если окажется, что $B \leq \chi^2$, то гипотезу однородности дисперсии можно принять, так как $\frac{B}{C} < B \leq \chi^2$.

Таблица 1.5

Критические значения критерия Пирсона $\chi^2 (P, f)$

f	Доверительная вероятность P			
	0,9	0,95	0,975	0,99
1	2,706	3,841	5,024	6,635
2	4,605	5,991	7,378	9,210
3	6,251	7,815	9,348	11,345
4	7,779	9,488	11,143	13,277
5	9,236	11,070	12,833	15,086
6	10,645	12,594	14,449	16,812
7	12,017	14,067	16,013	18,475
8	13,362	15,507	17,535	20,090
9	14,684	16,919	19,023	21,666
10	15,987	18,307	20,483	23,209
11	17,275	19,675	21,920	24,725
12	18,549	21,026	23,337	26,217
13	19,812	22,362	24,736	27,688
14	21,064	23,685	26,119	29,141
15	22,307	24,996	27,488	30,578
16	23,542	26,296	28,845	32,000
17	24,769	27,587	30,191	33,409
18	25,989	28,869	31,526	34,805
19	27,204	30,144	32,852	36,191
20	28,412	31,410	34,170	37,566
22	30,813	33,924	36,781	40,289

Окончание табл. 1.5

f	Доверительная вероятность P			
	0,9	0,95	0,975	0,99
24	33,196	36,415	39,364	42,980
26	35,563	38,885	41,923	45,642
28	37,916	41,337	44,461	48,278
30	40,256	43,773	46,979	50,892

Если дисперсии не однородны, то необходимо выполнить преобразования y , чтобы они стали однородными. Довольно часто помогает замена величины y на $\ln y$.

Воспроизводимость опытов и однородность дисперсий достигается, когда выявлены источники нестабильности эксперимента, а также посредством более точных методов и средств измерений. Проверку достаточной точности измерения значений независимых переменных можно осуществить, сопоставив ее с диапазоном измерения последних. Считается, что ошибки определения независимых переменных не должны превышать 0,05...0,07 интервала их варьирования. Ошибки в определении значений зависимой переменной не влияют так значительно на точность регрессионного анализа и могут составлять 0,3 интервала варьирования.

Отсутствие коррелированности независимых переменных может проверяться изложенным выше расчетом парных коэффициентов корреляции между ними.

Стационарным называется процесс, основные характеристики M_x и σ^2 которого постоянны или однородны во времени. Поскольку при пассивном эксперименте свойства процесса определяются по одной представительной выборке, распространить полученные результаты на весь процесс в целом можно только при условии его стационарности, проверка которой производится в приведенном ниже порядке.

По результатам измерений параметра строится случайная последовательность значений этого параметра, соответствующая порядку проведения измерений. Полученный интервал значений разбивают на несколько (5...10) равных отрезков, для каждого отрезка устанавливается дисперсия $S_{y_j}^2$ и с помощью критерия Кохрена по формуле (1.24) определяется, являются ли значения $S_{y_j}^2$

на каждом из отрезков оценками одной и той же генеральной дисперсии.

Затем на каждом из отрезков производится сравнение средних арифметических $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N$, соответствующих выборочным дисперсиям $S_1^2, S_2^2, \dots, S_N^2$, числам степеней свободы $f_1, f_2, \dots, f_N$ (обычно $f_j = n_j - 1$, где n_j — объем соответствующей выборки, отрезка). Всем выборкам соответствует единая генеральная дисперсия S^2 , в качестве ее оценки можно взять средневзвешенную дисперсию S_y^2 , которая рассчитывается по формуле (1.25).

Если справедлива нулевая гипотеза о равенстве всех генеральных средних, то в качестве оценки единого генерального среднего можно взять общее среднее всех элементов (отрезков), как бы объединенных в одну выборку. Обозначим это среднее через $\bar{y}$. Теперь для дисперсии S^2 можно дать другую оценку:

$$\bar{S}_2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N n_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2,$$

которой соответствует $N - 1$ степеней свободы. Чтобы нулевая гипотеза была справедлива, должно соблюдаться условие

$$\frac{\bar{S}_y^2}{S_y^2} \leq F_p$$

где значение критерия Фишера F_p может приниматься по табл. 1.6 [21], в которой представлены критические значения $F_{кр}$ этого критерия.

Таблица 1.6

Критические значения критерия Фишера F_p ($F_{кр}$)

P	$m_2 = f_b + 1$	$m_1 = f_x + 1$								
		4	6	8	10	15	20	30	40	60
0,90	4	5,39	5,31	5,27	5,24	5,20	5,18	5,17	5,16	5,15
0,95		9,28	9,10	8,89	8,81	8,70	8,66	8,62	8,59	8,57
0,99		29,5	28,2	27,7	27,3	26,9	26,7	26,5	26,4	26,3
0,90	6	3,62	3,45	3,37	3,32	3,24	3,21	3,17	3,16	3,14
0,95		5,41	5,05	4,88	4,77	4,62	4,56	4,50	4,46	4,43
0,99		12,1	11,0	10,5	10,2	9,72	9,55	9,38	9,29	9,20

Окончание табл. 1.6

P	$m_2 = f_B + 1$	$m_1 = f_X + 1$								
		4	6	8	10	15	20	30	40	60
0,90	8	3,07	2,83	2,78	2,70	2,63	2,59	2,56	2,54	2,52
0,95		4,35	3,87	3,79	3,64	3,51	3,44	3,38	3,34	3,32
0,99		8,45	7,19	6,99	6,62	6,31	6,16	5,99	5,91	5,86
0,90	10	2,81	2,61	2,51	2,44	2,34	2,30	2,25	2,23	2,21
0,95		3,86	3,48	3,29	3,18	3,01	2,94	2,86	2,83	2,79
0,99		6,99	6,06	5,61	5,35	4,96	4,81	4,65	4,57	4,48
0,90	15	2,5	2,24	2,19	2,12	2,01	1,96	1,91	1,89	1,86
0,95		3,34	2,85	2,76	2,65	2,46	2,39	2,31	2,27	2,22
0,99		5,56	4,46	4,28	4,03	3,66	3,51	3,35	3,27	3,18
0,90	20	2,40	2,18	2,06	1,98	1,86	1,81	1,76	1,73	1,70
0,95		3,13	2,74	2,54	2,42	2,23	2,16	2,07	2,03	1,98
0,99		5,01	4,17	3,77	3,52	3,15	3,00	2,84	2,76	2,67
0,90	30	2,28	2,05	1,93	1,85	1,72	1,67	1,61	1,57	1,54
0,95		2,92	2,53	2,33	2,21	2,01	1,93	1,84	1,79	1,74
0,99		4,51	3,70	3,30	3,07	2,70	2,55	2,39	2,30	2,21
0,90	40	2,23	2,00	1,87	1,79	1,66	1,61	1,54	1,51	1,47
0,95		2,84	2,45	2,25	2,12	1,92	1,84	1,74	1,69	1,64
0,99		4,31	3,51	3,12	2,82	2,52	2,37	2,20	2,11	2,02
0,90	60	2,18	1,95	1,82	1,74	1,60	1,54	1,48	1,44	1,40
0,95		2,76	2,37	2,17	2,04	1,84	1,75	1,65	1,59	1,53
0,99		4,13	3,34	2,95	2,72	2,35	2,20	2,03	1,94	1,84
0,90	120	2,13	1,90	1,77	1,68	1,55	1,48	1,41	1,37	1,32
0,95		2,68	2,29	2,09	1,96	1,75	1,66	1,55	1,50	1,43
0,99		3,95	3,17	2,79	2,56	2,19	2,03	1,86	1,76	1,66

Использование табл. 1.6 можно рассмотреть на следующем примере. Допустим, требуется оценить шероховатость в пяти опытах ($N = 5$), в которых применялись разные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) (фактор X). В каждом опыте замеры величины Ra осуществлялись шесть раз ($n = 6$). Матрица наблюдений и результаты расчетов Ra_{cp} и дисперсии S_i^2 представлены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Матрица наблюдений и расчетных значений

Номер СОЖ	Уровень фактора	Значение Ra , мкм, в опытах						Среднее значение $Ra_{ср}$, мкм	Значение S_i^2
		1	2	3	4	5	6		
1	X_1	0,72	0,60	0,65	0,32	0,80	0,52	0,60	0,028
2	X_2	0,15	0,62	0,22	0,40	0,25	0,30	0,32	0,028
3	X_3	0,45	0,30	0,50	0,58	0,48	0,32	0,44	0,012
4	X_4	1,20	0,92	0,72	0,80	1,00	0,80	0,91	0,031
5	X_5	0,58	0,90	0,70	1,00	0,48	0,60	0,71	0,040

Чтобы определить значимость изменения шероховатости по параметру Ra , вычислим: среднее значение дисперсии воспроизводимости

$$S_B^2 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 S_i^2 (0,028 + 0,028 + 0,012 + 0,031 + 0,04) =$$

$$= \frac{1}{5} (0,6 + 0,32 + 0,44 + 0,91 + 0,71) = 0,0278;$$

общее среднее

$$\mu = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Ra_{срi} = \frac{1}{5} (0,6 + 0,32 + 0,44 + 0,91 + 0,71) = 0,596 \text{ мкм};$$

общую дисперсию

$$S_o^2 = \sum_{i=1}^5 (Ra_{срi} - \mu)^2 = 0,212;$$

наблюдаемое значение критерия

$$F_{пн} = \frac{s_o^2}{s_B^2} = \frac{0,212}{0,0278} = 7,63;$$

числа степеней свободы $f_x = N - 1 = 4$ и $f_B = Nn - N = 25$ (здесь произведение Nn — общее число измерений). Тогда $m_1 = f_x + 1 = 5$ и $m_2 = f_B + 1 = 26$. Используя интерполирование, по табл. 1.6 найдем критическое значение критерия Фишера: $F_{кр} \approx 2,74$. Поскольку $F_{пн} > F_{кр}$ ($7,63 > 2,74$), то можно сделать вывод, что изменение

шероховатости поверхности деталей при изменении марки СОЖ следует считать значимым.

Проверку гипотезы случайности выборки, необходимую при пассивном эксперименте, можно произвести методом последовательных разностей. Этот метод заключается в следующем: по значениям x_i выборки ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), расположенным в последовательности их наблюдения, образуется $n - 1$ разностей между соседними членами:

$$a_1 = x_2 - x_1; \quad a_2 = x_3 - x_2, \dots, a_{n-1} = x_n - x_{n-1}.$$

Затем определяются величины

$$C^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} a_i^2, \quad S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

Для оценки случайности используется критерий

$$\tau = \frac{C^2}{S^2}.$$

Если $\tau < \tau_k$, где τ_k — критическое значение критерия при уровне значимости α (доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$), то гипотеза «случайности» верна. Допустимые нижние пределы значений τ_k при $n \leq 10$ и уровнях доверительной вероятности 0,99 и 0,95 (99 и 95 %) можно принимать по табл. 1.8 [17].

Таблица 1.8

Нижние пределы значений критерия τ_k

Число наблюдений n	Доверительная вероятность P		Число наблюдений n	Доверительная вероятность P	
	0,95	0,99		0,95	0,99
4	0,390	0,256	12	0,564	0,414
5	0,410	0,269	13	0,578	0,431
6	0,445	0,281	14	0,591	0,447
7	0,468	0,307	15	0,603	0,461
8	0,491	0,331	16	0,614	0,475
9	0,514	0,354	17	0,624	0,487
10	0,531	0,376	18	0,633	0,499
11	0,548	0,397	19	0,642	0,510

Окончание табл. 1.8

Число наблюдений n	Доверительная вероятность P		Число наблюдений n	Доверительная вероятность P	
	0,95	0,99		0,95	0,99
20	0,650	0,520	60	0,789	0,702
25	0,676	0,542	70	0,804	0,724
30	0,704	0,508	80	0,817	0,741
35	0,725	0,611	90	0,827	0,756
40	0,742	0,636	100	0,836	0,767
45	0,757	0,658	110	0,843	0,778
50	0,769	0,674	120	0,850	0,788

1.2.2. Применение метода наименьших квадратов

Метод наименьших квадратов (МНК) — универсальный и наиболее распространенный прием обработки результатов экспериментов. Он используется в регрессионном анализе для вычисления коэффициентов уравнений регрессии. Сущность МНК сводится к определению коэффициентов, обеспечивающих минимум суммы квадратов отклонений опытных данных y_i от значений $\hat{y}_i$, вычисленных по уравнению регрессии, т.е. минимум функции Φ :

$$\Phi = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \rightarrow \min, \quad (1.28)$$

где $\xi_i = y_i - \hat{y}_i$.

Рассмотрим однофакторную задачу для линейной зависимости

$$y = b_0 + b_1 x. \quad (1.29)$$

Для этой задачи

$$\xi_i = y_i - b_0 - b_1 x_i. \quad (1.30)$$

Обычно наблюдается стремление провести больше опытов, чем число неизвестных коэффициентов уравнения регрессии. Поэтому система уравнений, подобных (1.30), оказывается переопределенной и часто несовместной, имеющей бесконечно много решений или не имеющая их. Переопределенность возникает, когда число

уравнений больше числа неизвестных, несовместность — когда нет ни одного решения, обращающего все уравнения в тождества.

Только если все экспериментальные точки лежат на прямой, система превращается в определенную и имеет единственное решение. МНК обладает тем замечательным свойством, что позволяет делать определенной любую произвольную систему уравнений. При этом число уравнений становится равным количеству неизвестных их коэффициентов. Уравнение (1.29) имеет два неизвестных коэффициента. Определим их.

Соотношение (1.28) можно записать иначе:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2 \rightarrow \min.$$

Минимум некоторой функции, если он существует, достигается при одновременном равенстве нулю частных производных по всем неизвестным, в рассматриваемом случае:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial b_0} = 0,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial b_1} = 0.$$

Выполнение этой процедуры дает возможность составить систему, число уравнений в которой равно числу неизвестных коэффициентов. Такая система носит название **системы нормальных уравнений**. Для линейной зависимости с одной переменной (1.29) после дифференцирования и простейших алгебраических преобразований имеем

$$\begin{cases} b_0 \sum_{i=1}^n x_{i0}^2 + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i0} x_{i1} = \sum_{i=1}^n x_{i0} y_i, \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_{i0} x_{i1} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 = \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i, \end{cases} \quad (1.31)$$

где x_{i0} — фиктивная переменная, равная единице во всех точках факторного пространства.

Решение системы (1.31) при $x_{i0} = 1$ дает формулы для вычисления:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 - \sum_{i=1}^n x_{i1} \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i}{n \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_{i1} \right)^2};$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i - \sum_{i=1}^n x_{i1} \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_{i1} \right)^2}.$$

Система нормальных уравнений (1.31) имеет особенности: по диагонали матрицы коэффициентов уравнений под знаками суммы последовательно записываются квадраты значений независимых переменных; другие элементы матрицы симметричны относительно этой диагонали; правая часть системы составляет произведения, полученные последовательным умножением членов колонки параметра оптимизации на члены колонки факторов. Описанные свойства обеспечивают возможность использования простого метода составления системы нормальных уравнений при любом числе факторов.

В табл. 1.9 в качестве примера приведено расположение опытных данных для случая трех переменных.

Таблица 1.9

Данные для составления системы уравнений с тремя переменными

Номер точки	x_0	x_1	x_2	x_3	y
1	1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	y_1
2	1	x_{21}	x_{22}	x_{23}	y_2
3	1	x_{31}	x_{32}	x_{33}	y_3
...	...	...	...	...	...
n	1	x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	y_n

По данным табл. 1.9 составляются четыре уравнения системы. Первое уравнение получается умножением элементов первого столбца (x_0) сначала на самих себя, а затем на элементы всех

остальных столбцов по очереди. Второе уравнение формируется умножением элементов второго столбца на элементы остальных столбцов по очереди, начиная со столбца x_0 и т.д. Во всех уравнениях коэффициенты b_j располагаются в порядке возрастания индекса. Система принимает вид:

$$\begin{cases} b_0 \sum x_0^2 + b_1 \sum x_0 x_1 + b_2 \sum x_0 x_2 + b_3 \sum x_0 x_3 = \sum x_0 y; \\ b_0 \sum x_1 x_0 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 + b_3 \sum x_1 x_3 = \sum x_1 y; \\ b_0 \sum x_2 x_0 + b_1 \sum x_2 x_1 + b_2 \sum x_2^2 + b_3 \sum x_2 x_3 = \sum x_2 y; \\ b_0 \sum x_3 x_0 + b_1 \sum x_3 x_1 + b_2 \sum x_3 x_2 + b_3 \sum x_3^2 = \sum x_3 y. \end{cases}$$

В уравнениях системы суммирование производится по всем n опытным точкам.

Составление системы нормальных уравнений для полиномов выше первого порядка осуществляется аналогичным путем. Нелинейные члены уравнения регрессии при этом рассматриваются как самостоятельные переменные.

1.2.3. Достоверность результатов исследований и их оценка

Поскольку результаты корреляционно-регрессионного анализа, полученные на базе ограниченного числа экспериментальных данных, являются случайными величинами, необходимо оценивать их достоверность, определять доверительные интервалы, в которых находятся их истинные значения. Для этого последовательно производятся следующие операции:

- оценка достоверности коэффициентов корреляции;
- оценка значимости коэффициентов регрессии;
- оценка адекватности уравнения регрессии.

При любом объеме выборки и многомерном нормальном распределении рассматриваемых факторов вычисляется статистика, имеющая распределение Стьюдента с $f = n - 2$ степенями свободы.

$$t_{n\alpha} = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}. \quad (1.32)$$

Для проверки нулевой гипотезы H_0 при коэффициенте ρ корреляции генеральной совокупности, равном нулю, находят с использо-

ванием табл. 1.2 при фиксированном уровне значимости α (вероятности $P = (1 - \alpha)$ и числе степеней свободы $f = n - 2$ критическое значение $t_{n\alpha/2, n-2}$, удовлетворяющее условию $P(|t_n| \geq t_{n\alpha/2, n-2}) = \alpha$. Если наблюдаемое значение $t_n \geq t_{n\alpha/2, n-2}$, то нулевую гипотезу об отсутствии линейной зависимости между переменными x и y следует отвергнуть. Описанный метод наиболее часто используется при малых объемах выборок.

Пример. Пусть по выборке объема $n = 11$ [2], извлеченной из двумерной нормальной совокупности, вычислен эмпирический (опытный) коэффициент корреляции $r = 0,76$. Необходимо проверить нулевую гипотезу $H_0: \{\rho = 0\}$ против альтернативной гипотезы $H_a: \{\rho \neq 0\}$ при уровне значимости $\alpha = 0,01$.

Для решения по формуле (1.32) вычисляется статистика

$$t_{n\alpha} = 0,76 \sqrt{\frac{11-2}{1-0,76^2}} = 3,5.$$

По табл. 1.2 распределения Стьюдента при $\alpha = 0,01$ (доверительная вероятность $P = 1 - \alpha = 0,99$) и числе степеней свободы $f = n - 2 = 11 - 2 = 9$ находится $t_{n\alpha, P, n-2} = t_{n\alpha, 0,99; 9} = 3,25$. Так как $3,5 > 3,25$, то значение r значительно отличается от нуля, т.е. переменные x и y являются коррелированными.

При числе наблюдений $n > 50$ надежность коэффициента корреляции можно оценить по его среднему квадратическому отклонению

$$S_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} \quad (1.33)$$

и нормированному отклонению

$$t_r = \frac{|r|}{S_r}. \quad (1.34)$$

Достоверность коэффициента корреляции считается доказанной с вероятностью 0,997, если $t_r \geq 3$; с вероятностью 0,990 при $t_r \geq 2,58$; с вероятностью 0,95 при $t_r \geq 1,96$. При достаточно большом n и r , близким к 0,5, границы доверительного интервала для коэффициента корреляции ρ генеральной совокупности, из которой взята выборка, можно определить таким образом:

$$r - t_{кр} S_r \leq \rho \leq r + t_{кр} S_r. \quad (1.35)$$

Значение $t_{кр}$ устанавливается по таблице функции Лапласа для выбранной вероятности [17]. Если левая и правая части неравенства (1.35) имеют одинаковый знак, т.е. ρ не равно 0, то r имеет достоверный знак и является значимым.

В случае выборки малых объемов доверительный интервал для r можно определять по номограмме [2]. Формулы (1.32)–(1.35) справедливы и при оценке достоверности коэффициента множественной корреляции и корреляционных отношений.

Проверку значимости коэффициентов регрессии можно производить двумя способами: сравнением абсолютного значения коэффициента с доверительным интервалом; с помощью критерия Стьюдента $t_{n\alpha}$ (см. табл. 1.2). В первом случае доверительный интервал для коэффициента b_i вычисляется по формуле

$$\Delta b_i = \pm t_{n\alpha} S_{b_i}, \quad (1.36)$$

где $t_{n\alpha}$ — табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости и числе степеней свободы, для которых определялось значение S_{b_i} , S_{b_i} — среднее квадратическое отклонение для b_i .

Коэффициент значим, если его абсолютное значение больше доверительного интервала.

При проверке значимости коэффициентов вторым способом вычисляют

$$t'_{n\alpha} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}} \quad (1.37)$$

и сравнивают с табличным значением этого критерия. Коэффициент значим, если $t'_{n\alpha} > t_{n\alpha}$ для принятого уровня значимости и числа степеней свободы, при которых определялось значение S_{b_i} .

Статистически незначимые коэффициенты могут быть исключены из уравнения регрессии. Причем если уравнение получено с помощью методов планирования эксперимента, остальные коэффициенты пересчитывать не надо.

Методика определения величины S_{b_i} зависит от способа получения уравнения регрессии. В случае применения планирования эксперимента

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_{(y)}^2}{nN}, \quad (1.38)$$

где $S_{(y)}^2$ — дисперсия воспроизводимости эксперимента; n — число параллельных опытов в каждой точке матрицы при равномерном дублировании опытов (при отсутствии дублирования опытов $n = 1$); N — общее число опытов в матрице плана.

При равномерном дублировании опытов во всех строках матрицы плана число параллельных опытов одинаково. Для каждой строки этой матрицы вычисляют дисперсию S_j^2 результатов по данным параллельных опытов:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y})^2,$$

где y_{ju} — значение отклика b_j -й строки для u -го опыта.

Если величины S_j^2 результатов опытов однородны, то дисперсия $S_{(y)}^2$ воспроизводимости эксперимента определяется по выражению

$$S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2, \quad (1.39)$$

где N — число опытов или число строк матрицы плана.

При отсутствии дублирования опытов для определения дисперсии воспроизводимости эксперимента выполняют n_0 параллельных опытов при средних уровнях всех независимых факторов — в нулевой точке плана. По результатам этих опытов вычисляется

$$S_{(y)}^2 = \frac{1}{n_0-1} \sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2, \quad (1.40)$$

где y_u — значение функции отклика в u -м параллельном опыте.

При равномерном дублировании опытов число степеней свободы для расчета $S_{(y)}^2$ и, следовательно, S_{b_j} находится как $f = N(n-1)$, при отсутствии дублирования опытов $f = n_0 - 1$.

Если коэффициенты уравнения регрессии получены без планирования эксперимента — по результатам пассивного эксперимента, то средние квадратические отклонения коэффициентов регрессии:

□ для парной регрессии $\bar{y} = a + bx$

$$S_b = \frac{S_y \sqrt{1 - r_{xy}^2}}{S_x \sqrt{n}};$$

□ регрессии трех переменных $\bar{y} = a + bx + cz$

$$S_b = \frac{S_y \sqrt{1 - R_{y.xz}^2}}{S_x \sqrt{1 - r_{xz}^2} \sqrt{n}}, \quad S_c = \frac{S_y \sqrt{1 - R_{y.xz}^2}}{S_x \sqrt{1 - r_{xz}^2} \sqrt{n}};$$

□ регрессии многих переменных $\bar{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$

$$S_{b_1} = \frac{S_y \sqrt{1 - R_{y.x_1x_2\dots x_k}^2}}{S_{x_1} \sqrt{1 - r_{x_1x_2\dots x_k}^2} \sqrt{n}}.$$

Аналогичные формулы могут иметь место при расчете значений $S_{b_2}, S_{b_3}, \dots, S_{b_k}$.

Дальнейшая проверка значимости коэффициентов регрессии осуществляется по выражениям (1.36) и (1.37).

В зависимости от наличия сведений о дисперсии $S_{(y)}^2$ воспроизводимости эксперимента проверку адекватности уравнения регрессии можно осуществлять по двум схемам [18]. Первая из них применяется при отсутствии оценки дисперсии воспроизводимости, что присуще пассивному эксперименту, и состоит из трех этапов:

а) вычисление дисперсии относительно среднего значения параметра оптимизации — остаточной дисперсии для уравнения нулевого порядка

$$S_{y_0}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{N - 1};$$

б) расчет дисперсии, характеризующей отклонение экспериментальных значений величин от найденных по уравнению регрессии. Если порядок уравнения заранее неизвестен, то в случае многофакторного пространства уместно делать начало с уравнения первого порядка

$$S_{y_1}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{f}, \quad (1.41)$$

где $\hat{y}_i$ — значение параметра оптимизации, вычисленное по уравнению регрессии для условий i -го опыта; $f = (N - q)$ — число сте-

пений свободы; q — число коэффициентов регрессии, для линейного уравнения $q = k + 1$; для неполного квадратного уравнения, включающего члены типа $b_j x_j$, и $b_{ij} x_i y_j$, $q = k(k + 1)/2 + 1$; для полного квадратного уравнения $q = k(k + 3)/2 + 1$; k — число факторов;

в) вычисление опытного значения отношения дисперсий — критерия Фишера

$$F_{po} = \frac{S_{y_0}^2}{S_{y_1}^2}, \quad (1.42)$$

которое затем сравнивается с критическим значением критерия Фишера $F_{кр(n_1, n_2)}$ (см. табл. 1.6). Если $F_{po} \leq F_{кр}$, то использование уравнения регрессии первого порядка не имеет смысла, так как в изученном интервале изменения уравнений факторов оно описывает исследуемую систему — процесс не лучше, чем уравнение нулевого порядка. Поэтому составляется уравнение второго порядка, рассчитывается значение $S_{y_2}^2$ и $F_1 = S_{y_2}^2 / S_{y_1}^2$. После этого проверяется значимость приведенного отношения по критерию Фишера F_p . Процедура повторяется до тех пор, пока не выполнится условие $F_{pn} \geq F_{кр(n_1, n_2)}$. Индекс n соответствует степени предпоследнего полинома.

Вторая схема используется в том случае, если известна дисперсия воспроизводимости $S_{(y)}^2$ эксперимента. Тогда для оценки адекватности модели вначале рассчитывается дисперсия адекватности $S_{ад}^2$ по выражению (1.41), а затем вычисляется опытное значение критерия Фишера

$$F_{po} = S_{ад} / S_{(y)}^2.$$

Если $F_{po} \geq F_{кр(n_1, n_2)}$, то модель можно считать адекватной. Значение $S_{(y)}^2$ в зависимости от характера дублирования опытов определяется по выражениям (1.39) или (1.40) [18].



1.3. Методы планирования экспериментов

1.3.1. Планирование однофакторного эксперимента

Планирование экспериментов заключается прежде всего в выборе интервалов между экспериментальными уровнями факторов, порядка проведения опытов, рандомизации внешних условий в однофакторном эксперименте с помощью таблиц случайных чисел и рандомизированных блоков, расчетов параметров математических моделей многофакторных экспериментов. *Рандомизация* — это способ перевода систематических ошибок в случайные, который широко используется при постановке активных экспериментов.

Для сокращения продолжительности и повышения эффективности эксперимента необходимо до его проведения установить интервалы между значениями факторов. Вначале определяют общие пределы изменения независимых факторов, обусловленные их физической природой или возможностями оборудования (примерами таких ограничений являются температура плавления или предел прочности исследуемого металла, предельные значения частот вращения и подачи станка и др.). Затем определяют, как следует изменять уровни факторов внутри этих областей.

Существует два основных критерия, на основе которых производится выбор точек, отвечающих условиям проведения опыта:

- относительная точность данных на различных участках области планирования;
- характер экспериментальной функции.

Во многих случаях получаемые данные имеют неодинаковую точность на различных участках области экспериментирования. Можно ожидать, например, что испытания, проводимые при пониженной мощности или малом давлении, напоре, будут наименее точными.

Если анализ ошибок показывает, что на каком-то участке области экспериментирования данные вызывают наибольшие сомнения, то, естественно, стараются заполнить этот участок большим числом опытных точек. Нельзя установить какое-либо жесткое правило, указывающее, сколько дополнительных отсчетов следует сделать при получении сомнительных данных. Однако можно счи-

тать, что в этом случае справедливо общее правило, связывающее повышение точности с числом дополнительных отсчетов. Четыре измерения дают вдвое большую, а девять — втрое большую точность, чем одно, и т.д.

Если точность измерений одинакова для всех факторов и отклика, желательно, чтобы расстояния между точками на экспериментальной кривой по всей ее длине были одинаковыми. Этого можно добиться, зная характер функции $y = f(x)$, приведением ее к линейному виду с помощью определенных алгебраических манипуляций. Ниже приведены примеры преобразования функций [19].

На графике величины

$$y = \frac{A + B}{x^2}$$

как функции $1/x^2$ равномерное расположение точек получится, если взять одинаковые приращения $1/x^2$.

Для функции

$$y = Ae^{-bx}, \quad \text{или} \quad \ln y = \ln A - bx,$$

где e — основание натурального логарифма, следует построить график y как функции $\ln x$, приняв одинаковые приращения $\ln x$.

Выбор необходимых интервалов между точками осуществляется прежде всего для обеспечения на всех участках кривой или карты одинаковой точности экспериментальных данных.

Существует два основных типа однофакторного эксперимента: последовательный и случайный (рандомизированный).

Последовательный эксперимент целесообразен в случаях, когда:

- 1) известно, что он невоспроизводим;
- 2) испытуемая система (объект) имеет особенности, которые можно обнаружить лишь при получении данных в регулярной последовательности;
- 3) продолжительность, стоимость или сложность экспериментов таковы, что рандомизированный эксперимент нецелесообразен.

В первом случае суть последовательного эксперимента заключается в том, что уровень фактора изменяется скачкообразно, т.е. используется последовательная, шаговая стратегия. После каждого шага производится анализ результатов и на основании этого анализа принимается решение о ходе дальнейшей работы.

Второй случай имеет место, например, при анализе стабильности технологического процесса механической обработки. В процессе эксперимента строится точечная диаграмма в координатах: измеряемый размер (ордината) — время или номер выборки (абсцисса). Когда хотя бы одна опытная точка попадает на контрольную границу или за ее пределы, необходимо произвести подналадку станка. Здесь для исключения возможного брака также необходимо выборки для измерений брать в определенной последовательности, а не произвольно.

Третий случай характерен обычно для экспериментального изучения работы металлургических или термических печей, установок для других агрегатов, время достижения теплового равновесия которых составляет несколько дней и поэтому изменение рабочих условий в процессе эксперимента должно быть как можно меньшим.

Если уровень фактора меняется случайным образом, принимая то меньшие, то большие значения, план эксперимента называется *рандомизированным*. Основной целью рандомизации является сведение эффекта некоторого неслучайного фактора к случайной ошибке.

Наиболее распространенные систематические погрешности эксперимента обусловлены:

- изменением внешних условий в процессе эксперимента. К последним можно отнести как атмосферные условия (температура среды, влажность, давление и т.д.), так и связанные с состоянием испытуемой системы (например, нагревом) или влиянием рядом расположенных систем (например, вибрации соседних станков, ударные сотрясения молотов и т.п.);

- снижением работоспособности оператора;

- нарушениями характеристик аппаратуры или оборудования при работе их в различных диапазонах изменения исследуемой величины, что может быть вызвано наличием заедания в механизмах измерительных устройств, повышением сопротивления сдвигу подвижных элементов при отсутствии смазочного материала в системах, воздействием других значимых факторов.

Рандомизация плана эксперимента достигается с помощью:

- таблицы случайных чисел (табл. 1.10) [21];

- игрового метода;

- введения специальных блоков.

Таблица 1.10

Таблица случайных чисел

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15	10	45	10	05	93	55	19	23	09	14	35
34	30	14	86	19	65	74	14	58	73	71	16
61	66	87	28	56	01	03	79	07	40	11	14
28	06	44	68	55	06	30	77 -	51	71	82	76
60	45	37	72	25	79	92	20	95	42	14	51
47	33	29	03	43	28	14	18	62	47	61	44
08	42	88	62	26	48	46	50	57	60	87	49
06	58	58	71	34	67	57	78	96	01	45	85
99	52	35	93	63	09	52	22	68	16	06	16
15	24	22	95	07	56	11	13	61	15	13	65
28	68	71	58	82	42	78	61	16	26	32	38
82	72	06	96	21	24	66	15	83	77	09	05
92	86	89	50	39	06	91	42	90	53	25	24
13	38	93	05	74	99	12	72	79	75	69	39
84	99	52	63	83	94	53	67	78	59	66	63
10	58	91	41	58	04	38	74	71	97	87	07
99	02	82	20	99	93	25	37	49	02	19	79
74	65	74	12	64	62	33	50	19	60	94	86
34	89	71	51	67	95	64	09	08	21	71	30
02	87	58	28	82	92	88	67	07	18	61	12
81	55	12	84	03	91	23	01	13	32	08	29
88	52	23	07	72	09	91	35	74	17	54	76
38	93	98	71	18	69	55	84	35	73	17	46
25	83	36	86	56	28	33	04	56	11	39	28
98	99	23	30	17	20	09	87	68	06	84	09
01	03	62	41	90	60	02	62	90	46	77	73
56	65	70	35	92	35	31	98	43	03	97	02
03	30	20	29	41	12	88	99	62	21	27	54
07	86	87	40	32	02	64	03	98	06	41	05
14	79	88	59	73	91	81	01	42	04	46	88
46	57	12	50	29	13	51	82	39	24	03	70
17	65	51	70	50	36	70	60	16	34	87	13

Окончание табл. 1.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
67	71	37	89	73	26	28	14	45	14	29	78
89	98	57	53	69	00	44	62	73	97	41	21
05	25	56	45	64	06	33	77	25	83	65	98
38	85	52	87'	23	87	05	23	65	75	47	61
40	07	62	24	92	27	51	71	18	27	16	59
76	32	79	47	42	83	71	45	73	35	33	46
62	16	49	06	75	51	22	32	85	75	03	21

Метод случайных чисел можно иллюстрировать таким примером. Требуется рандомизировать во времени 6 опытов, обозначенных римскими цифрами от I до VI. Можно поставить им в соответствие любые 6 последовательных чисел, взятых в любой строке или любом столбце таблицы случайных чисел. Повторяющиеся цифры при этом следует отбросить. Так, могут быть получены следующие группировки: I — 60; II — 13; III — 07; IV — 16; V — 33; VI — 31. Путем расположения случайных чисел в порядке возрастания или убывания получается искомая последовательность реализации опытов: III, II, IV, VI, V, I или I, V, VI, IV, II, III.

Игровой метод предполагает, что выбранные комбинации условий можно пронумеровать, а номера вытаскивать, как при лотерее, или в случае наличия двух или более игровых костей разного цвета можно, например, принять очки кости красного цвета за десятки, а очки кости зеленого цвета — за единицы и при наличии четырех очков на красной кости и двух очков на зеленой кости записать число (номер) 42. Комбинации условий можно пронумеровать от 11 до 16, от 21 до 26 и т.д. и план эксперимента составлять путем последовательного бросания игровых костей.

Принципы и пример построения блочных планов рассмотрены ниже.

Даже если рассматривается всего один регулируемый фактор, было бы неправильно не учитывать влияние различных других нерегулируемых (внешних) условий, состояние испытываемой системы, работоспособность оператора и т.д. Уровни внешних факторов такого рода изменяются непрерывно во времени, и их влияние лучше всего компенсировать путем простой рандомизации плана эксперимента.

Внешние факторы могут быть также дискретными (группы людей, станков или приборов, производственные периоды, размеры партии материалов, различные дни недели или времена года и т.д.) и оказывать определенные непрогнозируемые воздействия на исход эксперимента.

Поскольку невозможно исключить влияние многих внешних факторов или вычислить поправку на их воздействие, можно путем рандомизации свести к минимуму их эффект за счет более равномерного распределения уровней этих факторов в течение всего эксперимента. В тех случаях, когда дискретные внешние факторы могут быть идентифицированы, выделены, возможно использование рандомизированных блоков.

Допустим, требуется проверить работу нового резца в производственных условиях. Необходимо определить оптимальную скорость обработки, обеспечивающую максимальный выход продукции, чтобы при этом доля брака не превышала некоторой заданной. Это однофакторный эксперимент, в котором фактором является скорость обработки, а откликом — выход продукции R . В таком эксперименте один явный внешний фактор — рабочий, обслуживающий станок. Каким образом следовало бы выбрать типичного или среднего представителя для проведения эксперимента из группы, скажем, 20 рабочих? У рабочих могут в значительной мере отличаться уровень мастерства, характер, физическая сила, поэтому выбор единственного среднего рабочего для проведения эксперимента не имеет смысла. Поэтому случайным образом выбираются четыре рабочих. Предположим, что каждый из них будет работать полную смену при заданной скорости обработки. Для сбалансирования эксперимента можно выбрать четыре разные скорости обработки с тем, чтобы каждый рабочий за четыре дня опробовал каждую из них. Полученные для каждой скорости обработки результаты можно усреднить. Путем обозначения скоростей цифрами 1, 2, 3 и 4, а рабочих — буквами A, B, C, D можно получить план, отраженный в табл. 1.11.

Приведенный план далек от совершенства, поскольку в нем не учтена последовательность изменения условий эксперимента. С одной стороны, энтузиазм, интерес, которые вызывает работа новым инструментом, могут ослабнуть, и по этой причине снизится выработка рабочего. С другой стороны, может проявиться опыт и натренированность рабочего и тогда выработка повысится.

Таблица 1.11

План эксперимента в первом варианте

Рабочий	День недели			
	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг
<i>A</i>	1	2	3	4
<i>B</i>	1	2	3	4
<i>C</i>	1	2	3	4
<i>D</i>	1	2	3	4

Осуществим полную рандомизацию приведенного плана эксперимента в том смысле, чтобы только один из рабочих производил в данный день обработку заготовок на одной из скоростей, используя ее только один день в рассматриваемый период. Тогда план будет иметь вид, приведенный в табл. 1.12. В первой строке измененного плана цифры расположены в порядке возрастания, а в столбцах — через строку.

Таблица 1.12

Частный план по методу латинского квадрата

Рабочий	День недели			
	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг
<i>A</i>	1	2	3	4
<i>B</i>	3	4	1	2
<i>C</i>	2	1	4	3
<i>D</i>	4	3	2	1

В результате построен так называемый латинский квадрат, представляющий собой частный план в общем семействе планов факторных экспериментов, хотя последний термин предполагает не только рандомизацию условий эксперимента, но и анализ результатов с использованием статистических методов. Приведенный план позволяет по сути оценивать влияние внешних факторов на выход продукции.

Можно еще более усовершенствовать план эксперимента по испытанию резцов. Если каждый рабочий в течение всего эксперимента будет работать на одном станке, а станки могут значительно отличаться друг от друга, то вследствие различий между станками

может появиться систематическая ошибка в результатах эксперимента. Задаются условия их работы таким образом, чтобы каждый рабочий обслуживал данный станок только один день и чтобы на каждой скорости обработки каждый станок работал только один день. Если обозначить станки буквами W, X, Y, Z , то план примет вид, представленный в табл. 1.13. Такой план носит название *греко-латинского квадрата*, он позволяет усреднить влияние следующих трех факторов: день недели, станок, рабочий. Здесь имеет место попарное чередование W, X, Y и Z по столбцам и по строкам.

Таблица 1.13

План эксперимента по методу греко-латинского квадрата

Рабочий	День недели			
	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг
A	1 W	2 X	3 Z	4 Y
B	3 X	4 W	1 Y	2 Z
C	2 Y	1 Z	4 X	3 W
D	4 Z	3 Y	2 W	1 X

Для многих экспериментов квадрат не всегда является наиболее удобным планом. Так, скорость обработки можно изменять шесть раз при наличии трех рабочих и трех станков. Большое число частично сбалансированных и несбалансированных планов экспериментов описано в литературном источнике [19] и других изданиях.

Часто для обычного инженерного эксперимента вполне достаточно построить план по методу греко-латинского квадрата типа 3×3 . Например, при скоростях резания 1, 2, 3, 4, 5 и 6, рабочих A, B и C и станках X, Y и Z можно построить два квадрата 3×3 (табл. 1.14).

Таблица 1.14

План по методу греко-латинского квадрата типа 3×3

Рабочий	День недели					
	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг	Пятница	Суббота
A	1 X	3 Z	5 Y	2 X	4 Z	6 Y
B	3 Y	5 X	1 Z	4 Y	6 X	2 Z
C	5 Z	1 Y	3 X	6 Z	2 Y	4 X

В этом случае построение по столбцам осуществлено путем перестановок цифр и букв. Шесть скоростей обработки распределены равномерно между первым и вторым блоком по три дня недели в целях обеспечения как можно большего их перекрытия. Приведенный в табл. 1.14 план не является столько же рандомизированным, как квадрат с 36 ячейками (6 рабочих, 6 станков, 6 дней недели), но он вполне приемлем и удовлетворителен.

1.3.2. Планирование многофакторного (полного факторного) эксперимента

Статистическое планирование эксперимента позволяет во многом устранять недостатки классического регрессионного анализа, каковыми являются корреляционная связь между коэффициентами уравнений и сложность оценки ошибки расчетного значения параметра оптимизации и интерпретации физического смысла уравнений регрессии. Основой методов статистического планирования эксперимента является использование упорядоченного плана расположения опытных точек в факторном пространстве и переход к новой системе координат [2, 12, 13, 17, 19, 21].

В линейной задаче (линейный регрессионный анализ), допустим, рассматриваются k факторов $x_1, x_2, \dots, x_k$, образующих k -мерное факторное пространство (к ним нужно добавить еще одну фиктивную переменную для оценки свободного члена в уравнении регрессии). Уравнение регрессии записывается в следующем виде:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k.$$

Задачу получения выборочных оценок b_i , коэффициентов регрессии β_i ($b_i \rightarrow \beta_i$) можно решать однофакторным методом, варьируя уровень каждого фактора по очереди. Если факторы варьируются только на двух уровнях (+1 и -1) при числе повторных опытов n , то дисперсия оценки коэффициента регрессии

$$S^2\{b_i\} = S^2 \left\{ \frac{y_i - y_0}{2} \right\} = S^2 \frac{\{y\}}{2n},$$

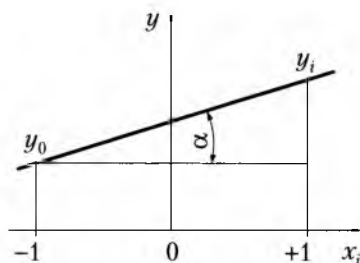


Рис. 1.1. Определение коэффициента $b_i \operatorname{tg} \alpha$ по двум опытам, повторяющимся n раз

где $b_i = \frac{y_i - y_0}{2}$ (рис. 1.1). Эта величина не зависит от общего числа учитываемых факторов, поскольку каждый из них изучается отдельно, значение b_i определяется результатами всего двух усредненных измерений, которыми и задается значение дисперсии коэффициента регрессии.

Можно принять другую стратегию, варьируя уровни сразу всех факторов так, чтобы роль каждого фактора оценивалась по всей совокупности опытов. В благоприятном случае дисперсия оценки коэффициента уравнения регрессии по сравнению с единичным измерением уменьшается в $(k + 1)n$ раз, так как оценка будет производиться по результатам всех $(k + 1)n$ опытов. Таким образом, эффективность многофакторного эксперимента возрастает с увеличением числа факторов. Однако даже в случае линейной регрессии не всегда удастся построить хороший план эксперимента, позволяющий столь резко уменьшать дисперсии в оценках параметров. В случае нелинейной регрессии вводится сложная система критериев оптимальности плана эксперимента и на базе соответствующих математических методов оптимизируется использование факторного пространства [8].

Планы эксперимента, цель которого — отыскание модели процесса в виде полинома первой или второй степени (см. § 1.2), называются планами соответственно первого или второго порядка. Полный факторный и дробный факторный планы, которые представлены ниже, относятся к планам первого порядка. Первым этапом составления плана эксперимента является выбор его условий, к числу которых можно отнести: область экспериментирования; основной уровень исследуемых факторов с интервалом их варьирования; точность фиксирования факторов.

При выборе области экспериментирования следует учитывать ограничения уровней факторов и предварительную (априорную) информацию, полученную в подобных, выполненных ранее исследованиях.

Нулевая точка (основной уровень) является центром изучаемой области изменения данного фактора. В случае, когда задачей эксперимента является оптимизация какого-либо параметра, нулевую точку следует располагать как можно ближе к положению оптимума параметра. Тогда за нулевой уровень фактора принимается тот, посредством которого в предварительных опытах получено наилучшее значение параметра оптимизации. В случае если задачей эксперимента является получение модели процесса, за нулевую точку принимается середина интервала изменения данного фактора.

Конечно, на выбор интервала варьирования уровня фактора накладываются верхние и нижние ограничения. Этот интервал, например, не может быть меньше ошибки, с которой исследователь фиксирует уровень фактора, поскольку тогда верхний и нижний уровни окажутся неразличимыми. В то же время интервал не может включать уровни фактора, при которых его верхний и нижний уровни выходят за пределы области определения. Если интервал от области определения фактора составляет не более 10 %, то он считается узким, не более 30 % — средним, а в остальных случаях — широким.

При решении задачи оптимизации для первой серии опытов желательно выбрать такую подобласть изменения уровня фактора, которая давала бы возможность скорейшего приближения к оптимуму. В описательных задачах (задачи интерполяции) интервал варьирования уровней факторов должен охватывать всю область экспериментирования. Обычно уровни факторов выбираются симметричными относительно нулевой точки и тогда интервал варьирования — это расстояние на координатной оси между основными верхним и нижним уровнями фактора. В целях упрощения записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных масштабы по осям выбирают так, чтобы верхний уровень фактора соответствовал +1, нижний -1, а основной — нулю. Для факторов с непрерывной областью определения это всегда можно сделать, перейдя к новой системе координат.

Обозначим через z_{1j} и z_{2j} соответственно нижнюю и верхнюю границы изменения уровня j -го фактора, y — параметр оптимиза-

ции. Тогда, например, для двухфакторной задачи область факторного пространства, подлежащая изучению, будет иметь вид прямоугольника (рис. 1.2, а) с координатами угловых точек: 1 ($z_{21}; z_{12}$), 2 ($z_{11}; z_{12}$), 3 ($z_{21}; z_{22}$), 4 ($z_{11}; z_{22}$). Координаты центра изучаемой области обозначим z_{0j} , а координаты любой точки — z_{ij} . Представим уровень фактора в кодированном (безразмерном) виде:

$$x_{ij} = \frac{z_{ij} - z_{0j}}{J_j} = \frac{z_{ij} - \frac{z_{1j} + z_{2j}}{2}}{\frac{z_{1j} - z_{2j}}{2}} = \frac{2z_{ij} - z_{1j} - z_{2j}}{z_{1j} - z_{2j}}, \quad (1.43)$$

где J_j — интервал варьирования уровня j -го фактора.

Подставив в формулу (1.43) вместо z_{ij} координаты точек 1, 2, 3, 4, получим их в новой системе безразмерных координат с началом в центре исследуемой области (рис. 1.2, б).

Точность фиксирования уровней фактора определяется стабильностью их в ходе опыта и точностью приборов, которая может быть высокая (погрешность измерения до 1 %), средняя (точность до 5 %) и низкая (точности до 10 %).

Если план эксперимента содержит все возможные комбинации всех факторов на определенном числе уровней равное число раз, то он именуется полным факторным планом. При известном числе факторов можно сразу найти число N опытов, которые необходимы для выполнения всех возможных сочетаний уровней факторов:

$$N = p^k,$$

где p — число уровней фактора; k — число факторов.

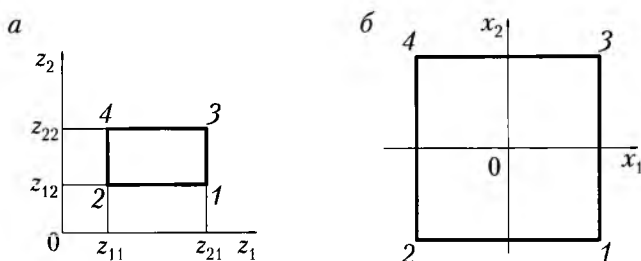


Рис. 1.2. Расположение исследуемых областей факторного пространства в системах:

а — натуральных координат; б — кодированных координат

При числе уровней каждого фактора, равном двум, налицо полный факторный план эксперимента типа 2^k . Геометрической интерпретацией полного факторного плана 2^k является квадрат (рис. 1.2, б), центр которого — основной уровень фактора, а стороны параллельны осям координат и равны удвоенному интервалу его изменения.

Записав координаты точек 1, 2, 3, 4 в виде таблицы, получим так называемую матрицу плана, которая при включении в нее результатов опытов имеет вид, представленный в табл. 1.15. Каждый столбец в такой матрице называется вектор-столбцом, а каждая строка именуется вектор-строкой.

Таблица 1.15

Матрица плана с результатами опытов

Номер опыта	x_1	x_2	y
1	+1	-1	y_1
2	-1	-1	y_2
3	+1	+1	y_3
4	-1	+1	y_4

При двух факторах все возможные комбинации их уровней можно найти прямым перебором, но с ростом числа факторов необходимо знать определенные приемы построения матриц. Как правило, используются три приема, основанные на переходе от матриц меньшей размерности к матрицам большей размерности.

Первый прием заключается в записи исходного плана для одного уровня нового фактора и повторении его для другого уровня. При переходе от плана 2^2 к 2^3 построение матрицы показано в табл. 1.16.

Таблица 1.16

Переход к матрице большего объема

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	y	Номер опыта	x_1	x_2	x_3	y
1	-	-	+	y_1	5	-	-	-	y_5
2	+	-	+	y_2	6	+	-	-	y_6
3	-	+	+	y_3	7	-	+	-	y_7
4	+	+	+	y_4	8	+	+	-	y_8

Второй прием основан на правиле чередования знаков. В первом столбце матрицы знаки меняются поочередно, во втором они чередуются через 2, в третьем — через 4, в четвертом — через 8 и так далее в соответствии с возрастанием степени числа 2. Табл. 1.15 является примером реализации и этого приема.

Для реализации третьего приема вводится правило перемножения столбцов матрицы. При построчном перемножении элементов двух столбцов матрицы произведение единиц с одноименными знаками дает +1, а с разноименными —1. Воспользовавшись этим правилом, для рассматриваемого случая получим вектор-столбец произведений x_1x_2 в исходном плане. Повторим еще раз исходный план, а у столбца произведений знаки поменяем на обратные. Этот прием можно перенести на построение матриц любой размерности, однако он сложнее, чем первые два.

Планы эксперимента типа 2^k независимо от числа факторов обладают определенными общими свойствами, которые определяют качество модели. Ведь эксперимент и планируется для того, чтобы получить модель, обладающую некоторыми оптимальными свойствами. Это значит, что оценки (значения) коэффициентов модели должны быть наиболее точными, а точность предсказания значения оптимизируемого параметра не должна зависеть от направления движения в факторном пространстве.

Два свойства плана 2^k следуют непосредственно из построения его матрицы. Первое из них — симметричность относительно центра эксперимента — формулируется таким образом, что алгебраическая сумма элементов каждого столбца матрицы равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 0,$$

где x_{ij} — уровень j -го фактора в i -м опыте; N — число опытов; $j = 1, 2, \dots, k$.

Второе свойство — условие нормировки — сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}^2 = N.$$

Указанное свойство является следствием того, что уровни факторов в матрице задаются +1 и -1.

Равенство нулю скалярных произведений всех вектор-столбцов называется свойством ортогональности матрицы планирования:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}^2 x_{ij} = 0; \quad u \neq j; \quad j = 0, 1, \dots, k.$$

Указанное свойство способствует значительному упрощению расчета коэффициентов уравнения регрессии.

Важное место в исследованиях занимает расчет параметров математической модели. Линейная модель двухфакторного эксперимента имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2. \quad (1.44)$$

Необходимо по результатам эксперимента найти значения неизвестных коэффициентов приведенной модели. Эксперимент, содержащий конечное число опытов, дает возможность получить не истинные значения неизвестных коэффициентов, а лишь их выборочные оценки. При этом точность этих оценок зависит от свойств выборки и нуждается в статистической проверке (см. п. 1.1.2).

Оценки коэффициентов можно вычислить по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} y_i}{n}, \quad j = 0, 1, \dots, k. \quad (1.45)$$

Для определения коэффициента b_1 в формуле (1.44) используется вектор-столбец x_1 , для b_2 — вектор-столбец x_2 . При расчете величины b_0 вводится, как и в МНК, вектор-столбец значений фиктивной переменной x_0 ; которая принимает во всех опытах значение +1 (это учтено в записи формулы (1.45), где j принимает значения от 0 до k). Таким образом, $b_0 = \bar{y}$.

Поскольку коэффициенты регрессии для каждого фактора определяются независимо от других факторов, по их значениям можно судить о силе влияния данного фактора. Чем большее числовое значение коэффициента, тем большее влияние на оптимизируемый параметр оказывает фактор. Если коэффициент положительный, то с повышением уровня фактора параметр оптимизации увеличивается, и наоборот. Значение коэффициента соответствует вкладу данного фактора в значение параметра оптимизации при переходе фактора с нулевого уровня на верхний или нижний уровень.

Иногда удобно оценивать вклад фактора при переходе его от нижнего к верхнему уровню. Вклад фактора в значение параметра оптимизации, определенный таким образом, называется *эффектом фактора*. Он численно равен удвоенному коэффициенту уравнения регрессии. Для качественных факторов, варьируемых на двух уровнях, основной уровень не существует. Поэтому понятие «эффект фактора» является здесь естественным. Примерами качественных факторов могут быть: оператор, станок, сорт металла, СОЖ и т.д.

Планируя эксперимент, на первом этапе стремятся получить линейную модель, хотя и нет гарантии, что в выбранных интервалах варьирования уровней факторов процесс описывается линейной моделью.

Один из часто встречающихся видов нелинейности системы связан с тем, что эффект одного фактора зависит от уровня другого фактора. В этом случае говорят, что имеет место эффект взаимодействия факторов.

Полный факторный план эксперимента позволяет количественно оценивать эффекты взаимодействия факторов. Для этого надо, пользуясь правилом перемножения столбцов матрицы плана, получить столбец произведений уровней двух факторов, с которым можно обращаться так же, как с вектор-столбцом уровней любого фактора. Важно, что при добавлении столбцов, отражающих эффекты взаимодействия факторов, все рассмотренные выше свойства плана сохраняются.

Матрица полного факторного плана 2^2 , учитывающего эффект взаимодействия факторов, представлена в табл. 1.17.

Таблица 1.17

Матрица плана 2^2 с эффектом взаимодействия факторов

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y
1	+1	+1	+1	+1	y_1
2	+1	-1	+1	-1	y_2
3	+1	-1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	-1	-1	y_4

Теперь модель выглядит так:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2,$$

а коэффициент b_{12} вычисляется обычным путем:

$$b_{12} = \frac{(+1)y_1 + (-1)y_2 + (+1)y_3 + (-1)y_4}{4}.$$

Вектор-столбцы x_1 и x_2 непосредственно определяют условия эксперимента, а x_0 и $x_1 x_2$ служат только для расчета коэффициентов b_0 и b_{12} .

Эффект взаимодействия двух факторов называется эффектом первого порядка, трех факторов — второго порядка и т.д. Часто применяются термины: парные эффекты взаимодействия факторов ($x_1 x_2, x_2 x_3, \dots$), тройные ($x_1 x_2 x_3, x_2 x_3 x_4, \dots$) и т.д. Вообще, максимальный порядок эффекта взаимодействия факторов при полном факторном плане на единицу меньше числа факторов, а сумма числа всех возможных эффектов, включая b_0 , линейные эффекты и взаимодействия всех порядков, равна числу опытов.

Чтобы найти число возможных взаимодействий некоторого порядка, можно воспользоваться обычной формулой числа сочетаний

$$C_k^m = \frac{k!}{m!(k-m)!},$$

где k — число факторов; m — число элементов взаимодействия.

Так, например, для плана 2^4 число парных взаимодействий

$$C_4^2 = \frac{4!}{2!2!} = 6.$$

1.3.3. Дробный факторный план

По мере увеличения числа факторов значительно возрастает количество опытов полного факторного плана, а также число степеней свободы $f = N - q$ (здесь N — число опытов; q — число неизвестных коэффициентов регрессии). Для линейного уравнения регрессии $q = k + 1$ (здесь k — число факторов). Так, при $k = 3$: $N = 8, q = 4, f = 4$; при $k = 5$: $N = 32, q = 6, f = 26$. Для расчета неизвестных коэффициентов регрессии достаточно, чтобы $f = 1$.

Резонно возникает вопрос о сокращении числа опытов для сохранения всех или хотя бы большей части выгод, получаемых при ортогональном (прямоугольном или образующем прямой угол) плане эксперимента. Ставится задача: построить ортогональный

план с уменьшенным числом опытов по сравнению с полным факторным планом. Для решения этой задачи используется метод дробных реплик.

Метод заключается в том, что для нахождения математического описания процесса используется часть полного факторного плана ($1/2$, $1/4$ и т.д.), называемая **дробным факторным планом** или **дробной репликой полного факторного плана**. Расчет коэффициентов регрессии, проверка их значимости и адекватности математической модели при этом производится так же, как и при полном факторном плане.

Например, полный факторный план 2^4 для случая $k = 4$ включает 16 точек. Для получения линейной модели требуется минимум 6 точек ($q = 5$, $f = 1$). Существует ортогональный план, для которого число точек $6 \leq m \leq 16$. Это план для случая $k = 3$. Поскольку для линейной модели эффекты взаимодействия принимаются равными нулю, можно воспользоваться любым из вектор-столбцов, характеризующих эффекты взаимодействия, для четвертого фактора ($x_1x_2x_3$ или $-x_1x_2x_3$). Приняв для фактора x_4 вектор-столбец $x_1x_2x_3$, получим план 2^3 (табл. 1.18). Такой план содержит только половину опытов полного факторного плана, т.е. является полурепликой плана 2^4 . Символически дробные реплики записываются таким образом:

$$N = 2^{k-l},$$

где k — общее число факторов.

Если l — число линейных эффектов, приравненных к эффектам взаимодействия, то $k - l$ — это число факторов в полном факторном плане, к которому приравнивается дробная реплика. Рассмотренный выше дробный план можно обозначить 2^{4-1} .

Перед проведением эксперимента по дробным репликам необходимо определить, каким эффектом взаимодействия можно пренебречь без большого риска.

Таблица 1.18

Дробный факторный план 2^3

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	$x_4 = x_1x_2x_3$
1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	-1

Окончание табл. 1.18

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	$x_4 = x_1x_2x_3$
3	-1	+1	+1	-1
4	-1	-1	+1	+1
5	+1	+1	-1	-1
6	+1	-1	-1	+1
7	-1	+1	-1	+1
8	-1	-1	-1	-1

Приняв в рассмотренном примере

$$x_4 = x_1x_2x_3, \quad (1.46)$$

получим генерирующее соотношение, на основе которого создается (генерируется) дробная реплика. После умножения обеих частей выражения (1.46) на x_4 получим

$$x_4^2 = x_1x_2x_3x_4,$$

т.е. имеется в левой части единичный вектор-столбец:

$$1 = x_1x_2x_3x_4. \quad (1.47)$$

Полученное выражение называется *определяющим контрастом*. Оно обеспечивает возможность установить разрешающую способность дробной реплики, т.е. найти, какие из коэффициентов уравнения регрессии являются несмешанными оценками для соответствующих генеральных коэффициентов.

При выборе полуреплики 2^{4-1} возможно 8 решений:

1) $x_4 = x_1x_2$;	5) $x_4 = x_1x_3$;
2) $x_4 = -x_1x_2$;	6) $x_4 = -x_1x_3$;
3) $x_4 = x_2x_3$;	7) $x_4 = x_1x_2x_3$;
4) $x_4 = -x_2x_3$;	8) $x_4 = -x_1x_2x_3$.

Разрешающая способность полуреplik, полученных посредством генерирующих соотношений, различна. Так, полуреplik 1–6 имеют по 3 фактора в определяющем контрасте, а 7 и 8 — по 4. Полуреplik 7 и 8 имеют максимальную разрешающую способность и называются главными. Разрешающая способность дробных реplik тем выше, чем больше символов входит в соотношение (1.46).

Осуществим последовательное умножение определяющего кон-
траста (1.47) на x_j ($j = 1, 2, 3, 4$) с учетом, что вектор x^2 содержит
только +1:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_1^2 x_2 x_3 x_4 = x_2 x_3 x_4; \quad x_2 = x_1 x_3 x_4; \\ x_3 &= x_1 x_2 x_4; \quad x_4 = x_1 x_2 x_3. \end{aligned} \right\} \quad (1.48)$$

Соотношения (1.48) указывают на равенство определенных
вектор-столбцов в матрице плана, что приводит к получению сме-
шанных оценок коэффициентов модели, рассчитанных с их помо-
щью:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{234}, \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{134}, \quad b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{124}, \quad b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{123},$$

где b_i — выборочная оценка i -го коэффициента регрессии; β_i — его
истинное значение (математическое ожидание).

Поскольку тройные эффекты обычно равны нулю, можно счи-
тать, что коэффициенты уравнения регрессии, оценивающие ли-
нейные эффекты и смешанные с коэффициентами при тройных
взаимодействиях, практически являются несмешанными оценка-
ми соответствующих истинных значений коэффициентов при ли-
нейных эффектах. Умножив обе части соотношения (1.47) на $x_i x_j$,
получим:

$$x_1 x_2 = x_3 x_4, \quad x_1 x_3 = x_2 x_4 \quad \text{и т.д.} \quad (1.49)$$

Из соотношений (1.49) следует, что коэффициенты уравнения
регрессии при парных эффектах взаимодействия факторов явля-
ются смешанными оценками. Это значит, что, например, коэффи-
циент b_{12} может входить в уравнение регрессии совместно с эф-
фектами $x_1 x_2$ или $x_3 x_4$. Оба эти эффекта оказывают равное влияние
на параметр оптимизации в изученной области факторного про-
странства. В этом случае выбор того или иного эффекта произво-
дится с учетом физико-химической природы исследуемого про-
цесса, технологических факторов и задач исследования.

При отсутствии априорной (независимой от опыта, предше-
ствующей опыту) информации об эффектах взаимодействия фак-
торов стремятся выбрать реплику с наибольшей разрешающей
способностью, так как, например, тройные эффекты взаимодей-
ствия факторов обычно менее важны, чем парные, четверные и т.д.

Рассмотренные выше дробные реплики, содержащие 2^{k-1} опытных точек, называются регулярными. Возможны также нерегулярные дробные реплики с количеством точек, не равным 2^{k-1} [например, $3/4 (2^k)$].

1.3.4. Порядок выполнения плана первого порядка и крутое восхождение по поверхности отклика

Исходя из априорной информации о процессе, возможностей аппаратуры и целей эксперимента, перед проведением опытов необходимо установить граничные уровни каждого фактора (z_{1j} и z_{2j}), координаты центра плана (основного уровня факторов) и интервал варьирования уровней факторов.

Основной уровень j -го фактора и интервал варьирования его уровня определяются по формулам

$$z_{0j} = \frac{z_{2j} + z_{1j}}{2}; \quad J_j = \Delta_j = \frac{z_{2j} - z_{1j}}{2}.$$

Кодирование переменных осуществляется по формуле (1.43).

Необходимые для постановки эксперимента сведения заносятся в специальную таблицу (табл. 1.19), а потом составляется план эксперимента, в который вносятся результаты n ($n = 2 \dots 5$) параллельных опытов (табл. 1.20).

Таблица 1.19

Сведения для постановки эксперимента

Характеристики факторов	z_1	z_2	z_3	...	z_k
Основной уровень	z_{01}	z_{02}	z_{03}	...	z_{0k}
Интервал варьирования	Δ_1	Δ_2	Δ_3	...	Δ_k
Верхний уровень (+1)	z_{21}	z_{22}	z_{23}	...	z_{2k}
Нижний уровень (-1)	z_{11}	z_{12}	z_{13}	...	z_{1k}

В практике оказывается достаточным проведение двух параллельных опытов, поскольку для проверки адекватности уравнения регрессии используется средняя дисперсия воспроизводимости. Возможны три варианта дублирования опытов при выполнении исследований:

□ равномерное дублирование, когда во всех строках матрицы плана число параллельных опытов одинаково;

- неравномерное дублирование, при котором число параллельных опытов в разных строках матрицы не одинаково;
- дублирование опытов отсутствует.

Таблица 1.20

План эксперимента с параллельными опытами

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	...	x_k	Параллельные опыты			
						y_1	y_2	...	y_n
1	+1	+1	+1	...	+1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n}
2	+1	-1	+1	...	+1	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n}
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
m	-1	-1	-1	-1	-1	y_{m1}	y_{m2}	...	y_{mn}

Характер дублирования сказывается на математической обработке результатов наблюдений. С учетом вида дублирования она осуществляется по приведенной ниже схеме.

1. Для каждой строки матрицы плана вычисляется среднее арифметическое значение $\bar{y}_j$; параметра оптимизации и его дисперсия $S_{j.}^2$.

2. Проверяется однородность дисперсий S_j^2 результатов опытов. При равномерном дублировании опытов для этого используют критерий Кохрена [формула (1.24)], при неравномерном дублировании — критерий Бартлетта [формулы (1.25)–(1.27)]. При отсутствии дублирования опытов первые два этапа исключаются.

3. Если дисперсии результатов опытов однородны, вычисляется дисперсия воспроизводимости эксперимента: при равномерном дублировании опытов — по формуле (1.39), при неравномерном — (1.25), а при отсутствии дублирования опытов — по формуле (1.40).

4. Вычисляются коэффициенты уравнения регрессии [формула (1.45)], их дисперсии [формула (1.38)] и оценивается их значимость [формулы (1.36), (1.37)].

5. Проверяется гипотеза об адекватности модели [формулы (1.41), (1.42)].

Если линейная модель адекватна, переходят к поиску уровней факторов, обеспечивающих экстремальное значение (минимум или максимум в зависимости от постановки задачи) функции отклика, т.е. к решению задачи оптимизации. Среди экспериментальных

методов оптимизации наиболее развитым и распространенным является метод крутого восхождения.

Крутое восхождение эффективно тогда, когда все коэффициенты уравнения регрессии значимы. Незначимость определенных коэффициентов может быть обусловлена:

□ неудачным выбором интервалов варьирования уровней факторов;

□ включением факторов, не влияющих на параметр оптимизации;

□ большой ошибкой в результатах опытов.

Принятие решения о методах достижения значимости всех коэффициентов в уравнении регрессии в определенной ситуации зависит от того, какая из трех приведенных выше причин признана основной. В случае, когда принята первая причина, то изменяют интервалы варьирования уровней незначимых факторов и ставят новую серию опытов. Если принята вторая причина, то невливающие факторы стабилизируют и этим исключают их из анализа результатов опытов. В третьем случае увеличивают число параллельных опытов.

При методе крутого восхождения по поверхности отклика движение к оптимуму совершается по кратчайшему пути. Наикратчайший путь к вершине поверхности отклика — это движение в направлении градиента функции отклика, а по рис. 1.3 — это направление AB : перпендикулярно линиям постоянных значений уровня фактора. Градиент непрерывной однозначной функции φ есть вектор

$$\nabla\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x_1} \vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial x_2} \vec{j} + \dots + \frac{\partial\varphi}{\partial x_k} \vec{k},$$

где $\nabla\varphi$ — обозначение градиента; $\vec{i}, \vec{j}, \dots, \vec{k}$ — единичные векторы в направлении координатных осей факторного пространства.

Координаты регрессии являются оценками частных производных функции отклика. Путем изменения уровней факторов пропорционально значениям коэффициентов регрессии можно обеспечивать движение в направлении градиента функции отклика по самому крутому пути восхождения.

Техника расчета методом крутого восхождения может быть рассмотрена на примере задачи с одним фактором x_1 при исполь-

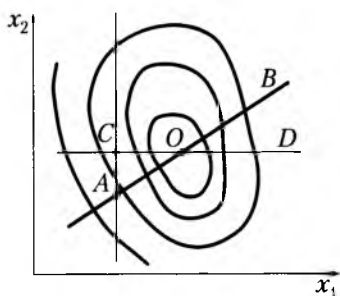


Рис. 1.3. Движение по поверхности отклика к экстремуму по методу крутого восхождения (прямая AB) и в однофакторном эксперименте (ломаная линия ACO)

зовании рисунка (рис. 1.4). Предположим, что кривая 1 является графиком неизвестной функции отклика. Реализацией плана эксперимента с центром в точке O получено уравнение регрессии $y = b_0 + b_1x_1$ (прямая 2), адекватно описывающее функцию отклика в области изменения уровня фактора x_1 от -1 до $+1$. Значение коэффициента регрессии b_x равно тангенсу угла наклона линии регрессии к оси абсцисс (оси O_1x_1). Если шаг движения по этой оси принять равным $\Delta x'$, то, умножив его на b_1 , получим координаты ($\Delta x'$ и $b_1\Delta x'$) точки A , лежащей на прямой 2 (направление градиента). После второго шага координаты новой точки B на той же прямой составят $2\Delta x'$ и $2b_1\Delta x'$ и т.д.

В случае k факторов крутое восхождение по каждому из факторов производят аналогичным образом, так как коэффициенты b_i определяются независимо друг от друга. При этом движение по градиентам всех факторов осуществляется одновременно.

Если определяется минимум функции y , то на каждом последующем шаге новые уровни факторов находятся путем вычитания из предыдущих величины $\Delta x'_i$. Такой способ оптимизации называют **методом наискорейшего спуска**.

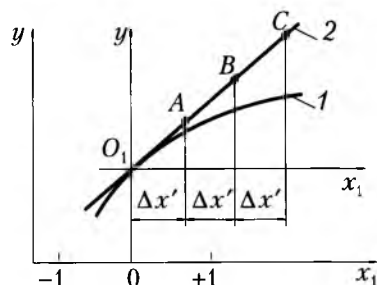


Рис. 1.4. Определение координат расчетных точек в направлении градиента

В найденных точках факторного пространства проводятся новые опыты, часть которых являются «мысленными», «расчетными». Они заключаются в вычислении значений функции отклика в точках факторного пространства, лежащих по пути к оптимуму («мысленное» движение к оптимуму). Некоторые из «мысленных» опытов реализуются для проверки соответствия найденной модели исследуемому процессу.

Движение к оптимуму прекращается в двух случаях, когда: 1) уровень одного (нескольких) фактора или значение функции отклика превысили допустимые; 2) достигнут экстремум параметра оптимизации. В первом случае процесс оптимизации заканчивается, во втором — в области экстремума функции y ищется новое математическое описание исследуемого процесса с использованием планов первого порядка. В случае получения адекватного описания этой функции полиномом первой степени оптимизация методом крутого восхождения может быть продолжена. Вполне очевидно, что оптимум, найденный в результате первого крутого восхождения, являлся локальным. Если же в области оптимума не удастся обеспечить получение адекватной модели с помощью планов первого порядка, то следует использовать планы второго порядка.

Движение по градиенту начинается для каждого фактора от его основного уровня x_{0i} . Координата первой расчетной точки по направлению градиента функции отклика по i -му фактору определяется по выражению

$$x_{1i} = x_{0i} + \lambda(b_i \Delta x_i),$$

где λ — некоторый коэффициент, одинаковый для всех факторов; b_i — коэффициент уравнения регрессии; Δx_i — интервал варьирования факторов в натуральных единицах.

Коэффициент λ может находиться различными способами. Один из них состоит в следующем: вычисляют произведения $b_i \Delta x_i$ для всех факторов; находят фактор, для которого значение этого произведения наибольшее (оно называется базовым); для базового фактора выбирают шаг измерения его уровня в направлении крутого восхождения $\Delta x'_0$ с таким условием, чтобы он был равен интервалу варьирования Δx_0 или части этого интервала, т.е.

$$\Delta x'_0 = \mu \Delta x_0 \quad (0 \leq \mu < 1).$$

Это условие можно выразить соотношением

$$\lambda |b_6| \Delta x_6 = \mu \Delta x_6,$$

откуда

$$\lambda = \frac{\mu}{|b_6|}.$$

Чаще всего $\mu = 0,3 \dots 0,9$.

Шаги изменения уровней факторов и координаты последующих расчетных точек можно находить по уравнениям

$$x_{hi} - x_{0i} = h\lambda(b_i \Delta x_i); \quad x_{hi} = x_{0i} + h\lambda(b_i \Delta x_i),$$

где $h = 1, 2, 3, 4, \dots$ — номер шага в направлении крутого восхождения.

Более подробно с вопросами оптимизации в технологических исследованиях можно ознакомиться по литературным источникам [2, 12, 14, 15, 16, 18, 21], а также по Методике выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов РДМУ-77 (М. : Изд-во стандартов, 1978. 127 с.).

1.3.5. Планы второго порядка

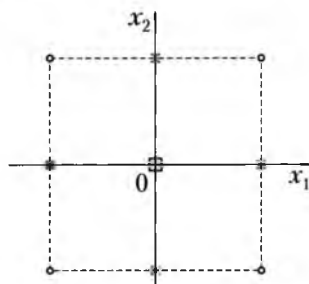
Если с помощью полного факторного плана эксперимента не удастся получить адекватного математического описания исследуемого процесса в форме многочлена первой степени, то его ищут в виде многочлена второй степени. С этой целью обычно используются композиционные планы Бокса — Уилсона. Различаются ортогональные и ротатабельные планы второго порядка.

Планы эксперимента второго порядка могут быть получены в результате достройки планов первого порядка путем добавления некоторого числа опытов в звездных точках и центре плана, поэтому их называют **композиционными**.

Схема опытов композиционного плана в случае двух факторов показана на рис. 1.5. Количество их определяется по формуле

$$N = 2^k + 2k + 1,$$

где k — число факторов; 2^k — количество опытов полного факторного плана; $2k$ — число звездных точек в факторном пространстве,



- Полный факторный эксперимент
- × Опыт в звездных точках
- Опыт в центре плана

Рис. 1.5. Схема опытов композиционного плана для двух факторов

имеющих координаты: $(\pm\alpha, 0, \dots, 0)$; $(0, \pm\alpha, \dots, 0)$, ..., $(0, 0, \dots, \pm\alpha)$; α — звездное плечо (звездный шаг); 1 — слагаемое, учитывающее опыт в центре плана, т.е. в точке факторного пространства с координатами $(0, 0, \dots, 0)$.

Значения звездного шага α , выбранные из условия ортогональности матрицы плана, зависят от числа факторов k (табл. 1.21).

Таблица 1.21

Значения звездного шага α

k	2	3	4	5
α	1,0	1,215	1,414	1,547

Уравнение регрессии при применении композиционного ортогонального плана эксперимента с характеристиками звездных точек b_0^* , x^* :

$$y = b_0^* + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{(k-1)k}x_{k-1}x_k + \\ + b_{11}x^* + \dots + b_{kk}x_k^*$$

где переменные звездных точек

$$x_{ji}^* = x_{ji}^2 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji}^2$$

вводятся для того, чтобы матрица плана была ортогональной и коэффициенты регрессии определялись независимо друг от друга по результатам опытов (здесь i — номер фактора, j — номер опыта).

Уравнение регрессии, записанное в обычной форме, имеет вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{(k-1)k}x_{k-1}x_k + \\ + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \dots + b_{kk}x_k^2.$$

Для получения этого уравнения находится величина

$$b_0 = b_0^* - \frac{b_{11}}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji}^2 - \dots - \frac{b_{kk}}{N} \sum_{j=1}^N x_{jk}^2.$$

Таблица 1.22 иллюстрирует в качестве примера матрицу ортогонального плана для двух факторов в соответствии с рис. 1.5.

Таблица 1.22

Матрица ортогонального плана для двух факторов

Система опытов	Номер опыта	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^*	x_2^*
Полный факторный план	1	-1	-1	+1	+0,33	+0,33
	2	+1	-1	-1	+0,33	+0,33
	3	-1	+1	-1	+0,33	+0,33
	4	+1	+1	+1	+0,33	+0,33
Опыты в звездных точках	5	+1	0	0	+0,33	-0,67
	6	-1	0	0	+0,33	-0,67
	7	0	+1	0	-0,67	+0,33
Опыт в центре плана	8	0	-1	0	-0,67	+0,33
	9	0	0	0	-0,67	-0,67

При применении ортогонального плана коэффициенты регрессии оцениваются с разными ошибками, а предсказанные значения параметра оптимизации также имеют различные дисперсии, сложным образом изменяющиеся от точки к точке. Эти недостатки композиционных ортогональных планов второго порядка во многих случаях приводят к отказу от их использования и применению ротатабельных планов. Но композиционные планы отличаются простотой вычислений и их применение целесообразно при ручных методах обработки результатов экспериментов.

Ротатабельный план эксперимента позволяет получать более точное математическое описание поверхности отклика по сравнению

с композиционным ортогональным планом, что достигается благодаря увеличению количества опытов в центре плана и обоснованному выбору звездного плеча α . В табл. 1.23 приведены характеристики ротатбельных планов.

Таблица 1.23

Основные характеристики ротатбельных планов

Число факторов	Число опытов по схеме ПФЭ*	Число опытов в звездных точках плана	Число опытов в центре плана	Общее число опытов	α
2	4	4	5	13	1,414
3	8	6	6	20	1,680
4	16	8	7	31	2,000
5*	32	10	10	52	2,378
5**	16	10	6	32	2,000

* Полный факторный эксперимент (план).

** Дробный факторный эксперимент (план).

Основным свойством ротатбельных планов является независимость дисперсий предсказанного значения y от вращения координат плана. В этом случае дисперсии одинаковы на равных расстояниях от центра плана.

В табл. 1.24 приведен пример ротатбельного плана для двух факторов.

Таблица 1.24

Ротатбельный план для двух факторов

Система опытов	Номер опыта	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2
Полный факторный план	1	-1	-1	+1	+1	+1
	2	+1	-1	-1	+1	+1
	3	-1	+1	-1	+1	+1
	4	+1	+1	+1	+1	+1
Опыты в звездных точках	5	+1,41	0	0	2	0
	6	-1,41	0	0	2	0
	7	0	+1,41	0	0	2
	8	0	-1,41	0	0	2

Окончание табл. 1.24

Система опытов	Номер опыта	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2
Опыты в центре плана	9	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0

Методики обработки планов второго порядка (композиционных ортогональных и ротатбельных) приведены в литературе, например, в источнике [18].

1.4. Анализ точности и стабильности процесса изготовления деталей



1.4.1. Погрешности обработки, точность и стабильность технологического процесса

При формообразовании деталей машин и приборов возникают погрешности отклонения действительных значений параметров от их номинальных значений. Источниками отклонений от заданных формы и размеров деталей являются: неточности оборудования (станков, процессов и т.д.), приспособлений, обрабатывающих инструментов, степень их износа; неоднородность заготовок деталей по размерам, форме, твердости и механическим свойствам материалов; неточность базирования заготовок в приспособлениях; температурные влияния, приводящие к изменению размеров заготовок, частей средств технологического оснащения; упругие деформации технологической системы (ТС), в состав которой входят оборудование, приспособления, инструмент, заготовка; отклонения от установленных режимов обработки; возникающие вибрации; изменение напряжения в электросети; неравномерность подачи смазочно-охлаждающих технических средств (СОТС), в том числе СОЖ, и другие факторы.

Погрешности обработки подразделяются на систематические (постоянные и переменные) и случайные. *Систематическими*

называются составляющие погрешности производства, постоянные по величине и знаку или изменяющиеся по определенному закону и выражающие значение погрешности в зависимости от времени или другой переменной. Систематическая постоянная погрешность имеет одно и то же значение для каждой изготовленной детали в партии. Например, при изготовлении партии деталей использована развертка, диаметр которой на 0,03 мм меньше требуемого размера. Поэтому размер отверстий всех деталей партии будет иметь систематическую постоянную погрешность, равную примерно –0,03 мм. Систематические погрешности складываются алгебраически, т.е. с учетом знака.

По СТБ ГОСТ Р 50779.10–2001 «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения» **случайной величиной** является переменная, которая может принимать любое значение из заданного множества значений (интервала). Случайные величины могут быть дискретными, когда они принимают только отдельные значения, и непрерывными, если могут принимать любые значения из конечного и бесконечного интервала. Случайные погрешности непостоянные по значению и знаку, их появление не подчиняется определенной закономерности, а поэтому эти погрешности не могут быть определены заранее. Данные случайные величины возникают по воле многих независимых друг от друга факторов. Обычно из множества факторов ни один не является доминирующим (определяющим).

Случайные погрешности вызывают, например, рассеивание размеров деталей, их трудно устранить. Поэтому влияние случайных погрешностей чаще всего учитывается допуском на значение величины. Показателям, например точности изготовления и измерения деталей, формообразуемым определенными технологическими процессами, свойственно возрастающее во времени рассеивание. Технологические процессы, обеспечивающие заданную точность, также характеризуются определенным значением соответствующего параметра.

В общем виде суммарная погрешность изготовления для данной настраочной партии деталей определяется выражением [17]:

$$\Delta = \Delta_{\text{п}} + \frac{1}{K_{\Delta}} \sqrt{\Delta_{\text{пр}}^2 K_{\text{пр}}^2 + \Delta_{\text{с}}^2}, \quad (1.50)$$

где Δ_{Π} — суммарная постоянная погрешность; $\Delta_{\text{пр}}$ — суммарная переменная погрешность; Δ_c — сумма случайных погрешностей; K_{Δ} , $K_{\text{пр}}$ — коэффициенты относительного рассеивания соответственно суммы случайных и переменных погрешностей ($\Delta_{\text{пр.с}}$) и суммы переменных погрешностей.

Формула (1.50) может быть записана и в виде

$$\Delta = \Delta_{\Pi} + \Delta_{\text{пр.с}},$$

где

$$\Delta_{\text{пр.с}} = \frac{1}{K_{\Delta}} \sqrt{\Delta_{\text{пр}}^2 K_{\text{пр}}^2 + \Delta_c^2}.$$

Так как при устойчивом процессе отработки величина $\Delta_{\text{пр}}$ подчиняется закону равной вероятности, то $K_{\text{пр}} = 1,73$. Значение коэффициента K_{Δ} определяется, по данным проф. Н.А. Бородачева, в зависимости от отношения $\Delta_{\text{пр}}/\Delta_c$ (табл. 1.25).

Таблица 1.25

Значения коэффициента K_{Δ}

$\Delta_{\text{пр}}/\Delta_c$	0,7	1	2	3
K_{Δ}	1,1	1,19	1,38	1,48

При $\Delta_{\text{пр}}/\Delta_c > 3$ следует принимать $K_{\Delta} = 1,73$.

Технологические процессы изготовления деталей и сборки изделий характеризуются точностью и стабильностью. В соответствии с СТБ ГОСТ Р 50779.10–2001, **точность** техпроцесса — это его свойство, обуславливающее близость действительных и номинальных значений параметров производимой по нему продукции. **Стабильность** техпроцесса — свойство, обуславливающее постоянство распределений вероятностей его параметров в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне.

В начальный момент после настройки станка на размер точность обработки определяется случайными и постоянными погрешностями. Переменные погрешности характеризуют степень стабильности обработки и влияют на ее общую точность в процессе работы станка. Для обеспечения точности обработки часто бывает необходимо разделить суммарную погрешность обработки на ее

составляющие. В связи с этим в технологической науке различают два вида **распределения признаков** (по указанному выше ГОСТ, признаки — это свойства, которые помогают идентифицировать или различать единицы данной совокупности; они могут быть количественными или качественными) качества продукции: мгновенное и суммарное.

Мгновенное распределение — это распределение признака, которое имело бы место, если бы действие всех производственных факторов на точность изготовления деталей не изменялось с течением времени, т.е. отсутствовали переменные погрешности. Это распределение признаков качества оценивается по малым выборкам, полученным за короткие интервалы времени.

Суммарное распределение обычно характеризует распределение изучаемого признака в партии деталей, изготовленных от наладки до подналадки станка. Оно оценивается по большим суммарным выборкам, состоящим из ряда мгновенных выборок.

Анализ точности обработки может осуществляться по точным диаграммам. Диаграмма разброса (рассеяния) по СТБ ГОСТ Р 50799.10–2001 есть графическое представление множества точек, координаты которых x и y в обычной прямоугольной системе координат являются значениями признаков X и Y .

В период изготовления деталей на настроенных станках фактические размеры деталей под влиянием переменных погрешностей изменяются. При устойчивом процессе среднее значение «мгновенных» совокупностей характеристик качества будет изменяться во времени по близкому к линейному закону, а рассеивание совокупностей будет оставаться практически постоянным в каждый момент времени работы оборудования. Также рассеивание случайных погрешностей незначительно будет изменяться по причине изнашивания обрабатывающего инструмента и возрастания сил обработки, но это увеличение настолько незначительно, что им можно пренебречь.

В упрощенном виде теоретические диаграммы точности изготовления деталей для токарной обработки их наружных цилиндрических поверхностей на настроенном оборудовании показаны на рис. 1.6 [17]. На диаграммах $\Delta - \tau$ по оси абсцисс откладывается время работы оборудования с момента его пуска (часы, минуты), а по оси ординат — отклонение действительных размеров деталей

от номинальных (микрометры). Линии 1, параллельные оси абсцисс, определяют постоянные погрешности, линии 2 и 4 — пределы рассеивания случайных погрешностей, а линии 3 характеризуют изменение среднего значения суммарной погрешности обработки в зависимости от переменной систематической ее составляющей. Точка τ_0 на оси абсцисс соответствует моменту пуска станка, τ_1 — моменту наступления стабилизации температуры резца (деформаций его от нагрева) и окончания приработки резца (его ускоренного первичного изнашивания), τ_k — моменту окончания работы станка в связи с необходимостью его подналадки. Пунктиром на диаграммах показаны кривые распределения размеров деталей в мгновенных и объединенных выборках.

Для обработки отверстий диаграммы имеют аналогичный вид, но повернуты на 180° относительно оси абсцисс.

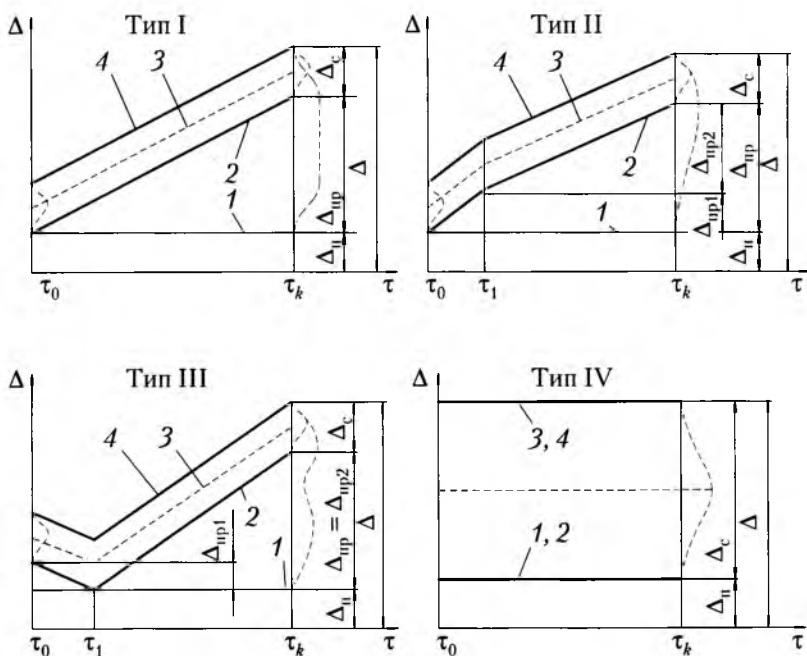


Рис. 1.6. Теоретические диаграммы точности изготовления деталей по наружным цилиндрическим поверхностям на настроенном оборудовании

Диаграмма типа I характерна для случаев, когда обработка производится доведенным резцом с охлаждением, т.е. отсутствует его начальный износ и деформации от нагрева. Этот тип диаграмм возможен и при работе доведенным резцом без охлаждения при условии, что продолжительность перерывов будет не меньше продолжительности работы резцов

Диаграмма типа II характерна для случаев обработки недоеденным резцом с охлаждением или без него, но при этом удлинение резца от нагрева в момент стабилизации температуры меньше его размерного износа за этот же отрезок времени ($\tau_1 - \tau_0$), либо при обработке недоеденным резцом без охлаждения, когда продолжительность перерывов не меньше времени работы резца.

Диаграмма типа III присуща условиям, когда обработка осуществляется доведенным или недоеденным резцом без охлаждения, а удлинение его от нагрева в момент стабилизации температуры больше размерного износа за тот же период времени ($\tau_1 - \tau_0$).

Диаграмма типа IV характерна для случая, когда отсутствуют переменные погрешности обработки, что возможно, например, при изготовлении очень мелких деталей приборов за короткий промежуток времени доведенным инструментом с СОЖ или без нее, если продолжительность перерывов не меньше времени работы инструмента, а также при изготовлении любых деталей на оборудовании с автоматической подналадкой резцов малыми импульсами.

Из анализа рис. 1.6 следует, что в зависимости от условий обработки заготовок на оборудовании (возможности применения СОЖ, доводки режущих кромок инструмента, соотношения продолжительностей обработки и перерывов, автоматической размерной настройки резца, стойкости инструмента и других факторов) изменение погрешности обработки во времени соответствует одному из четырех типов теоретических диаграмм точности. По сути все процессы обработки можно разбить по точности с момента пуска оборудования на четыре типа. Такое разделение обеспечивает выявление составных частей суммарной погрешности обработки и определения настроечного размера. В случае проведения исследований после того, как оборудование уже поработало некоторое время ($\tau > \tau_1$), возможны только два вида процессов, характеризующихся диаграммами типов I или IV.

1.4.2. Методы оценки и анализа точности и стабильности обработки

В технологической науке применяются аналитические, вероятностные и статистические методы оценки точности и стабильности обработки заготовок. В соответствии с этим рассматриваются расчетно-аналитические, вероятностные или статистические модели технологических процессов.

Теоретическая аналитическая модель предполагает полную обусловленность (детерминированность) процесса, для которого известны как начальная точность, так и ее зависимость от всех производственных факторов. Путем решения систем уравнений, описывающих закономерности переноса погрешностей технологического процесса, однозначно определяется искомая точность обработки. Однако реальные процессы обработки не могут быть правильно отражены детерминированными моделями, так как носят статистический характер. Ряд характеристик ТС (жесткость, износ инструмента, деформации элементов и т.д.) случайным образом меняются в процессе обработки. Трудно учесть влияние на точность обработки неконтролируемых факторов (напряжения в электрической сети, вибрации расположенных рядом станков и т.п.). Аналитический метод исследования точности технологических процессов применяется для оценки влияния тех или иных факторов в определенных условиях производства. Однако комплексную оценку погрешности обработки, обусловленной множеством факторов, этим методом получить трудно.

Вероятностная модель применяется, как правило, для определения вероятности того, что выходные параметры точности обработки $y_1, y_2, \dots, y_m$ при некотором изменении составляющих погрешностей $x_1, x_2, \dots, x_n$ не превысят заданных пределов. С этой целью определяется совместная плотность вероятности выходных и входных параметров точности за время τ : $f(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m, \tau)$. Исходную информацию для решения этой задачи могут дать функции распределения входных и выходных погрешностей обработки. Вероятностная модель может быть получена аналитическим, экспериментальным методами или путем статистического моделирования, например методом Монте-Карло. Вероятностные модели

применяются довольно редко, так как их возможности при решении технологических задач ограничены, а трудности получения велики.

Статистические методы широко применяются для анализа точности обработки на отдельных операциях и ее изменения в процессе всего технологического процесса. Достоинства этих методов — возможность оценки как комплексного влияния всех факторов на точность обработки, так и роли отдельных факторов, получения объективных, математически строгих характеристик точности и стабильности обработки; недостаток — невозможность использования на стадии проектирования технологического процесса из-за необходимости в значительном экспериментальном материале. За счет применения средств механизации и автоматизации регулирования и контроля качества продукции на основе статистических методов, использования ЭВМ, пакетов стандартных программ значительно облегчается сбор и обработка экспериментального статистического материала.

Контроль точности ТС может производиться по количественному или альтернативному признаку. По первому признаку определяются значения показателей точности, по второму — проверяется соответствие технологического процесса и средств технологического оснащения (оборудование, приспособления, инструменты) требованиям нормативно-технической документации (НТД).

Целью статистического анализа точности и стабильности технологического процесса и качества изделий на стадиях разработки, производства и эксплуатации продукции являются:

- выявление совместного влияния случайных и систематических факторов появления брака;
- выявление резервов технологии и производства;
- определение фактических показателей точности и стабильности технологического процесса, средств оснащения или продукции;
- обоснование технических норм и допусков на параметры качества продукции;
- обоснование выбора оборудования, оснастки (приспособления и инструменты) и средств контроля;
- установление соответствия качества продукции требованиям НТД; проверка соблюдения технологической дисциплины; выяв-

ление возможностей использования статистических методов регулирования и контроля;

□ изучение возможности модернизации средств технологического оснащения, необходимости их замены, механизации и автоматизации.

При статистическом анализе точности и стабильности технологического процесса и качества продукции используются методы: сравнения средних значений и дисперсий показателей качества; оценки коэффициентов корреляции; регрессионного анализа; дисперсионного анализа; нахождения оценок и доверительных границ для параметров распределений показателей качества; анализа временных рядов и случайных последовательностей.

Сравнение средних значений и дисперсий показателей качества продукции, а также дисперсионный анализ рекомендуются при оценке степени влияния тех или иных факторов на соответствующий показатель.

Оценка коэффициента корреляции применяется при необходимости проверки гипотезы о степени зависимости показателя качества от определенных факторов или одного показателя качества от другого, а также в других подобных случаях.

Регрессионный анализ используется для получения математической модели влияния различных факторов на исследуемый показатель качества продукции.

Оценки и доверительные границы для параметров распределений показателей качества определяются, когда требования к ним необходимо включить в техническую документацию и нормативы, а также оценить точность технологического процесса.

Анализ временных рядов и случайных последовательностей применяется при необходимости оценки изменения характеристики технологического процесса или качества продукции во времени, при исследовании структуры погрешности обработки, при разработке автоматических систем управления точностью обработки и т.д.

Рассеивание значений случайных величин может подчиняться различным законам распределения (СТБ ГОСТ Р 50779.10–2001). Установление закона распределения является первым и наиболее ответственным этапом статистического анализа точности и стабильности процесса изготовления качественных деталей машин и при-

боров. Достоверность результатов этого анализа в значительной степени определяется тем, насколько правильно подобран теоретический закон, описывающий распределение показателя. Ниже рассмотрены законы распределения, наиболее характерные для технологических исследований.

1.4.3. Законы распределения и оценка показателей точности обработки

Показатели точности обработки характеризуются графическими изображениями и формулами плотности распределения $f(x)$. Под параметром распределения понимается его числовая характеристика, постоянная для данных условий образования случайной величины, т.е. для ее генеральной совокупности. Например, нормальное распределение характеризуется двумя параметрами $\bar{x}$ и σ , распределение Максвелла — одним параметром σ и т.д. Существуют также такие параметры, как коэффициенты асимметрии и эксцесса (m_3 и m_4).

Эксцесс — это мера крутизны распределения случайной величины, в качестве которой используется параметр r_e , характеризующий отклонение вершины данного распределения от вершины нормального распределения, к которому оно близко. Коэффициент эксцесса обычно характеризует необычные, непредвиденные проявления ситуаций в исследованиях. Ниже рассмотрены законы распределения, характерные для показателей точности и стабильности обработки заготовок.

Равномерное (прямоугольное) распределение: распределение вероятностей непрерывной случайной величины, плотность распределения которой постоянна на конечном интервале (a, b) и равна нулю вне его. Распределение вероятностей такое, что

$$P_r(X = x_i) = \frac{1}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

В этом случае распределение дискретной случайной величины имеет равные вероятности для каждого из N значений:

$$P_{rj} = \frac{1}{N}, \quad j = 1, 2, \dots, N.$$

Нормальное распределение Лапласа – Гаусса: распределение вероятностей непрерывной случайной величины X такое, что плотность распределения вероятностей при $-\infty < x < +\infty$ принимает действительное значение

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right],$$

где μ — математическое ожидание; σ — стандартное отклонение нормального распределения.

Логарифмически нормальное распределение: распределение вероятностей непрерывной случайной величины X , которая может принимать любые значения от a до $+\infty$ и плотность распределения вероятности которой

$$f(x) = \frac{1}{(x-a)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log_e(x-a)-\mu}{\sigma}\right)^2\right],$$

где $x > a$; μ и σ — соответственно математическое ожидание и стандартное отклонение случайной величины $\log_e(x-a)$.

Часто вместо $\log_e$ (или $\ln$) используется $\log_{10}$. Тогда

$$f(x) = \frac{\log_{10} e}{(x-a)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\log_{10}(x-a)-\mu)^2\right],$$

где μ и σ — соответственно математическое ожидание и стандартное отклонение величины $\log_{10}(x-a)$; $\log_{10} e = 0,4343$.

Распределение χ^2 : распределение вероятностей непрерывной случайной величины, принимающей значения от 0 до $+\infty$, плотность распределения вероятностей которой

$$f(X^2; v) = \frac{(X^2)^{\left(\frac{v}{2}\right)-1}}{2^{v/2} \Gamma\left(\frac{v}{2}\right)} \exp\left[-\frac{X^2}{2}\right],$$

где $X^2 \geq 0$ при значении параметра $v = 1, 2, \dots$; Γ — гамма-функция:

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{m-1} dx.$$

Параметр m определяет форму распределения. При $m = 1$ гамма-распределение превращается в экспоненциальное распределение. При целом значении m гамма-функция принимает значение $\Gamma(m) = (m - 1)!$.

Сумма m независимых случайных величин, подчиняющихся экспоненциальному закону распределения с параметром

$$\lambda = \frac{1}{\alpha},$$

приводит к гамма-распределению с параметрами m и α .

Сумма квадратов независимых стандартизованных случайных величин v образует случайную величину χ^2 с параметром v , которая называется *степеню свободы* случайной величины χ^2 .

Распределение вероятностей случайной величины $\chi^2/2$ — это гамма-функция с параметром $m = v/2$.

Распределение Стьюдента (t -распределение): распределение вероятностей непрерывной случайной величины, плотность распределения вероятностей которой

$$f(t; v) = \frac{1}{\sqrt{\pi v}} \left(\frac{\Gamma\left[\frac{v+1}{2}\right]}{\Gamma\frac{v}{2}} \right) \left(\frac{1}{(1+t^2/v)^{\frac{v+1}{2}}} \right),$$

где $-\infty < t < +\infty$ с параметром $v = 1, 2, \dots$; Γ — гамма-функция.

По сути распределение Стьюдента — это отношение двух независимых случайных величин, числитель которого есть стандартизованная нормальная случайная величина, а знаменатель — положительное значение квадратного корня из частного от деления случайной величины χ^2 на ее число степеней свободы v .

Распределения Гумбеля, Фрэшэ, Вейбулла (экстремальные значения типов I, II, III) — распределения вероятностей непрерывной случайной величины x с функциями распределения:

- $F(x) = \exp(-e^{-y})$, при $-\infty < x < +\infty$;
- $F(x) = \exp(-y^{-k})$, при $x \geq a$;
- $F(x) = 1 - \exp(-y^k)$, при $x > a$;

где $y = (x - a)/b$; $-\infty < a < +\infty$; k — параметр, определяющий форму распределения, $k > 0$; $b > 0$.

Распределение Пуассона: распределение вероятностей дискретной случайной величины X такое, что

$$P_n[X = x] = \frac{m^x}{x!} e^{-m},$$

при $x = 0, 1, 2, \dots$ и параметре $m > 0$.

Математическое ожидание и дисперсия этого распределения равны параметру m . Распределение можно использовать при аппроксимации биномиального распределения, когда n — велико, p — мало, а $np = m$.

Распределения треугольное (Симпсона), Грама — Шарлье, Максвелла (Рэля), модуля разности и другие представлены в СТБ ГОСТ Р 50779.10–2001 и описаны в источниках [2, 13, 12, 16, 17, 18, 19].

Распределение суммы независимых случайных величин может быть определено распределениями ее слагаемых. Такое распределение можно назвать композицией распределений. Пусть, например, случайная величина представляет собой сумму двух независимых случайных величин x и y [13]:

$$z = x + y, \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq y \leq \infty.$$

Если плотности распределения x и y обозначить соответственно $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$, то плотность распределения

$$\varphi(z) = \int_0^{\infty} \varphi(x) \varphi(z - x) dx = \int_0^{\infty} \varphi(y) \varphi(z - y) dy. \quad (1.51)$$

Рассмотрим в качестве примера случай, когда случайная величина y распределена по равномерному распределению в интервале от a до b с плотностью $\varphi(y) = \varphi(z - x) = 1/(b - a)$, а случайная величина x распределена по нормальному распределению с плотностью

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-y-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}.$$

Согласно уравнению (1.51), плотность вероятности z

$$\varphi(z) = \int_a^b \varphi(y) \varphi(z - y) dy = \frac{1}{b - a} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{(z-y-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dy. \quad (1.52)$$

Здесь интервал берется в пределах от a до b , так как величина y отличается от нуля только в этом интервале. После преобразований выражение (1.52) можно записать в виде

$$\varphi(z) = \frac{1}{b-a} \left[\Phi\left(\frac{b-z+x}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-z+x}{\sigma}\right) \right].$$

Среднее значение z , согласно композиции распределения, имеет вид

$$\bar{z} = \bar{x} + \bar{y} = \bar{x} + \frac{b+a}{2},$$

а его дисперсия

$$S_z^2 = S_x^2 + S_y = S_x^2 + \frac{(b-a)^2}{12}.$$

Рассмотренная композиция распределения имеет место, если точность обработки существенно зависит от равномерно изменяющейся во времени систематической погрешности, обусловленной износом инструмента, тепловыми деформациями ТС и др. Пример образования такой погрешности показан на рис. 1.6 (тип I).

1.4.4. Организация экспериментов по оценке точности и стабильности технологического процесса

Задача экспериментальной оценки распределения показателей точности обработки решается в приведенной ниже последовательности.

1. Составляется план эксперимента, проводятся необходимые измерения и осуществляется их первичная обработка. Результаты наблюдений записываются в виде фактических значений исследуемых величин или отклонений их от номинальных. Полученные данные разбиваются на z равных интервалов, обычно $z \approx \sqrt{N}$, где N — объем выборки. Как правило, $z = 7 \dots 11$. Длина интервала $l = (x_{\max} - x_{\min})/z$, ($x_{\max}$, $x_{\min}$ — крайние значения x в выборке) должна быть больше цены деления шкалы измерительного устройства, которым производились измерения.

Определяются частоты: абсолютная f_j (абсолютное число наблюдений) и относительная $w_j = f_j/N$ (относительное число наблюдений)

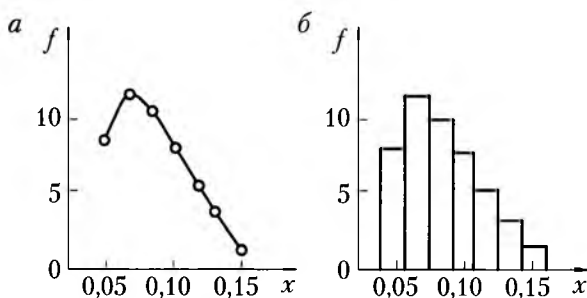


Рис. 1.7. Графическое изображение распределения эмпирических частот появления значений y внутри интервалов значений x :

a — полигон; b — гистограмма

Для каждого интервала. Составляется таблица распределения и строится его графическое изображение: полигон (рис. 1.7, a) и гистограмма (рис. 1.7, b) в координатах f_j и x_j или $w_j - x_j$, где x_j — середина или граница интервала, j — номер интервала. В каждый интервал включаются значения, лежащие в пределах от нижней до верхней границы интервала. Частоты значений, попавших на границы между интервалами, распределяются поровну между соседними интервалами. Полигон и гистограмма характеризуют определенное распределение случайной величины. Масштаб графиков по оси абсцисс выбирается произвольным, а по оси ординат рекомендуется такой, чтобы высота максимальной ординаты относилась к ширине основания кривой, как 5:8.

По таблице распределения рассчитываются выборочные значения $\bar{x}$ и S^2 по формулам

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^z f_j \bar{x}_j;$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum f_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{j=1}^z f_j (\bar{x}_j)^2 - N(\bar{x})^2 \right].$$

Расчеты могут быть значительно упрощены, если начало отсчета перенести в точку x_0 и выбрать рациональный масштаб.

Далее определяются доверительные интервалы, внутри которых с определенной вероятностью находятся истинные значения

$M[x]$ и $S_{\text{н}}^2$. Доверительные границы для математического ожидания $M[x]$ находятся по формуле (1.7), а для $S_{\text{н}}^2$ по условию

$$\frac{fS^2}{\chi_{1-p/2}^2} \leq S_{\text{н}}^2 \leq \frac{fS^2}{\chi_{p/2}^2}, \quad (1.53)$$

где $f = N - 1$ — число степеней свободы; $\chi_{1-p/2}^2$, $\chi_{p/2}^2$ — квантили (значение, которое заданная случайная величина не превышает с фиксированной вероятностью) распределения Пирсона или χ^2 -распределения, принимаются по табл. 1.5; p — уровень значимости.

2. Выбирается распределение исследуемой случайной величины. Выбор должен базироваться прежде всего на особенностях механизма изучаемого явления. В случае неясностей предварительный выбор распределения может быть сделан:

а) по виду полигона и гистограммы частостей выборочного распределения;

б) с помощью графического представления эмпирической функции на бумаге. В прямоугольной системе координат по оси ординат на вероятностной бумаге наносится шкала, соответствующая функции распределения нормированного теоретического распределения (у последнего $M[X] = 0$, $S_{\text{н}}^2 = 1$), а по оси абсцисс — линейная или логарифмическая шкала. Если распределение выбрано правильно, то при нанесении значений эмпирической функции распределения на вероятностную бумагу для соответствующего гипотетического закона распределения эти значения будут располагаться на прямой линии либо вблизи нее. Достоинства метода — простота, наглядность. Недостатки — необходимость наличия специальных бумаг; отсутствие количественного критерия допустимого отклонения значения эмпирической функции распределения от прямой линии; неоднозначность выбора распределения, обусловленная тем, что иногда на вероятностных бумагах для различных распределений значения эмпирической функции только примерно располагаются на прямой линии;

в) по данным ранее проведенных исследований. Недостаток метода — возможны значительные расхождения в механизмах изучаемых явлений (т.е. в конструкциях, технологии изготовления условиях эксплуатации исследуемых изделий) с ранее описанными:

г) по приближенным критериям — выборочным коэффициентам асимметрии и эксцесса. Если по данным выборки объема N найдены точечные оценки коэффициентов асимметрии

$$\hat{A} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{NS^3}$$

и эксцесса (отклонения)

$$\hat{E} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(Ns)^4} - 3$$

и их средние квадратические отклонения

$$S_A = \sqrt{\frac{6(N-1)}{(N+1)(N+3)}},$$

$$S_E = \sqrt{\frac{24N(N-2)(N-3)}{(N-1^2)(N+3)(N+5)}},$$

эмпирическая функция считается согласующейся с гипотетической при условии

$$\hat{A} - M[A] < 3S_A \quad \text{и} \quad \hat{E} - M[E] < 3S_A.$$

Если хотя бы одно из этих неравенств не выполняется, выдвинутая нулевая гипотеза отклоняется. Значения $M[A]$ и $M[E]$ можно рассчитывать по формулам, приведенным в источнике [13].

3. Производится выравнивание эмпирического распределения выбранным теоретическим. Цель выравнивания — определение координат точек теоретической кривой распределения (частостей), соответствующих точкам эмпирического полигона (таблицы) распределения. По результатам выравнивания производится более строгое сопоставление эмпирического и теоретического распределений и делается вывод об их соответствии.

Общее правило выравнивания состоит в том, что в функцию плотности вероятности вместо параметров теоретического распределения надо подставить их эмпирические характеристики, а затем рассчитать вероятности значений, соответствующих серединам

всех интервалов таблицы эмпирического распределения. Путем умножения этих вероятностей на число опытов N для каждого интервала вычисляются теоретические частоты появления соответствующих значений случайных величин, по которым можно построить выровненную кривую.

При выравнивании нормального распределения (Лапласа — Гаусса) теоретические частоты на базе сгруппированных опытных данных определяются по формуле

$$f'_j = \frac{Nl}{S} \varphi(t_j) = \frac{Nl}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_j^2}{2}},$$

где $t_j = (\bar{x}_j - \bar{x})/S$; l — длина интервала; N — объем выборки.

Пример [13]. Результаты измерений отклонений диаметров валов от номинального значения после обработки представлены в табл. 1.26.

Таблица 1.26

Отклонения диаметров валов от номинального значения

Интервал значений x_j , мм	$\bar{x}_j$	f_j	$\bar{x}_j - \bar{x}$	t_j	$\varphi(t_j)$	f'_j
0,02...0,04	0,03	9	-0,04	-1,274	0,177	5,6
0,04...0,06	0,05	13	-0,02	-0,637	0,326	10,4
0,06...0,08	0,07	11	0,00	0,000	0,399	12,7
0,08...0,10	0,09	8	0,02	0,637	0,326	10,4
0,10...0,12	0,11	5	0,04	1,274	0,177	5,6
0,12...0,14	0,13	3	0,06	1,911	0,064	2,0
0,14...0,16	0,15	1	0,08	2,548	0,015	0,5

Для приведенной выборки $\sum_j f_j = 50$, $\bar{x} = 0,07$ мм, $S = 0,0314$ мм, $l = 0,02$ мм. Предполагается, что опытное распределение подчиняется нормальному распределению Лапласа — Гаусса.

Вначале находится разность $\bar{x}_j - \bar{x}$ для каждого интервала, по ней определяются значения t_j и заносятся в таблицу. По таблице в источнике [17] находится значение $\varphi(t_j)$. Затем вычисляется отношение

$$\frac{Nl}{S} = \frac{500,02}{0,0314} = 31,85.$$

Путем умножения $\phi(t_j)$ на 31,85 получаются теоретические значения частот кривой распределения, выровненной по кривой нормального распределения. Значения теоретических частот f'_j заносятся в последнюю графу табл. 1.26.

Методики вычислений выравнивающих частот по другим распределениям приведены в литературных источниках.

4. Выполняется оценка степени согласия эмпирической функции распределения с теоретической. Эта оценка может производиться с помощью критериев χ^2 , Колмогорова (λ) или Смирнова (ω^2). Методика применения этих критериев отражена в ГОСТ 11.006–74 «Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим» и в источниках [2, 17].

5. Определяются параметры принятого распределения по результатам наблюдений.

Как отмечалось, объединенная выборка состоит из ряда мгновенных. В зависимости от целей статистического анализа объединенная выборка может включать детали, изготовленные: а) на одном станке за межнастроечный период; б) на одном станке при нескольких его настройках; в) на нескольких станках, выполняющих одну операцию при различных настройках. В первом случае объединенная выборка позволяет оценить влияние на качество обработки систематических и случайных погрешностей, имеющих место при одной настройке станка. Во втором случае учитываются также и погрешности настройки станка, а в третьем — и состояние оборудования на операции обработки заготовок деталей в целом. Объем объединенной выборки обычно составляет 10 или более мгновенных выборок (от 50 до 200 деталей).

Если считать допустимой погрешность ϵ определения величины σ по выборочному значению S равной $\pm 0,2S$ с вероятностью $P = 1 - \alpha = 0,95$, то достаточен объем выборки $N = 50$. С увеличением N точность определения σ возрастает. Поэтому обычно принимается $N \geq 100$.

Порядок отбора мгновенных выборок может быть непрерывным (одна за другой) и ступенчатым (с перерывами). Выбор метода формирования объединенной выборки зависит от соотношения между числом N' деталей, изготовленных за межнастроечный период, и принятым объемом выборки N . Если $N' \approx N$, то принимается непре-

рывный порядок отбора мгновенных выборок, если $N' \gg N$ – ступенчатый.

При анализе точности штучной продукции, когда $N' \gg N$, используются методы отбора выборок по ГОСТ 18321–74 «Статистический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции».

Измерения параметров деталей осуществляются измерительными средствами с ценой деления шкалы не более $1/6$ поля допуска измеряемой величины. Отбор деталей следует начинать сразу после подналадки (смены) обрабатывающего инструмента и маркировать их в порядке отбора. Последнюю мгновенную выборку должны составлять детали, изготовленные перед очередной наладкой инструмента.

Для каждой i -й мгновенной выборки рассчитываются и записываются в протокол: среднее арифметическое значение величины $\bar{x}_i$, наибольшее и наименьшее ее значения $\bar{x}_{i\max}$ и $\bar{x}_{i\min}$, размах значений $R_i = \bar{x}_{i\max} - \bar{x}_{i\min}$, среднее квадратическое отклонение S_i .

Оценку точности технологического процесса осуществляют:

- по точности его элементов с учетом их взаимосвязи;
- по точности изготавливаемой продукции.

Статистическая оценка точности производится, как правило, по второму методу. Основными показателями точности технологического процесса по контролируемому параметру в соответствии с ГОСТ 27.202–83 «Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции» являются:

- коэффициент точности

$$K_T = \frac{\omega}{T},$$

где ω – поле рассеивания контролируемого параметра или разность максимального и минимального его значений за установленную наработку ТС; T – допуск на контролируемый параметр;

- коэффициент мгновенного рассеивания

$$K_p(t) = \frac{\omega(t)}{T},$$

где $\omega(t)$ – поле рассеивания контролируемого параметра в момент времени t ;

□ коэффициент смещения

$$K_c = \frac{\bar{\Delta}(t)}{T},$$

где $\bar{\Delta}(t)$ — среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска в момент времени t :

$$\bar{\Delta}(t) = |\bar{x}(t) - x_0|,$$

здесь $\bar{x}(t)$ — среднее значение контролируемого параметра; x_0 — значение параметра, соответствующее середине поля допуска (при симметричном поле допуска значение x_0 совпадает с номинальным значением $x_{\text{ном}}$ параметра);

□ коэффициент запаса точности $K_z(t) = 0,5 - K_c(t) - 0,5K_p(t)$.

Для характеристики точности обработки используют также такие показатели, как коэффициент точности T_n ($T_n = 1/K_T = T/\omega$) и суммарная вероятная доля q брака (в процентах).

Поле рассеивания ω контролируемого параметра в технических расчетах с доверительной вероятностью γ определяется как

$$\omega = l(\gamma)S,$$

где $l(\gamma)$ — коэффициент, зависящий от закона распределения контролируемого параметра и значения γ (значения $l(\gamma)$ для $\gamma = 0,9973$ приведены в ГОСТ 27.202–83); S — среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра.

При повышенных требованиях к точности определения поля рассеивания ω (например, в научных технологических исследованиях) значение его может быть найдено для равномерного и нормального распределений с помощью табл. 1.27 и 1.28, в которых учтено, что значение S , определенное в результате измерения ограниченного числа деталей ($N = 20 \dots 100$), существенно отличается от генерального среднего квадратического отклонения S_r . Если принять, например, для нормального закона распределения $\omega = 6S$ (ГОСТ 27.202–83), то в результатах исследования будет внесена ошибка.

Значения l , K_z определены при $P = 1 - \alpha = 0,9973$, когда доля значений контролируемого параметра, находящихся в пределах определяемого фактического поля рассеивания, составляет 99,73 %.

Таблица 1.27

Рекомендуемые поля рассеивания ω параметра

Вид распределения	Поле рассеивания контролируемого параметра ω	Технологический допуск T_T	Возможная доля q брака
Равномерное	$3,46S_T$	$\omega + \bar{x} - B_{cp} \approx 1,1\omega$	$q = 1 - [T_n(0,5 + K_c) + T_n(0,5 - K_c)]$ или по табл. 1.29
Нормальное	$6S_T$ $2lS$		$q = 1 - \{ \Phi[6T_n(0,5 + K_c)] + \Phi[6T_n(0,5 - K_c)] \}$ или по табл. 1.29

Таблица 1.28

Значения показателей оценки технологического процесса

Параметр	Объем выборки N , шт.									
	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
$l(1 - \alpha = 0,9973)$	4,390	4,200	4,100	3,940	3,840	3,760	3,700	3,660	3,630	3,600
$K_3(1 - \alpha = 0,9973)$	7,660	7,300	7,050	6,750	6,550	6,400	—	6,220	—	6,100
$\eta(1 - \alpha = 0,95)$	1,460	1,391	1,344	1,284	1,246	1,220	—	1,184	—	1,162

Продолжение табл. 1.28

Параметр	Объем выборки N , шт.						
	200	300	400	500	600	800	1000
$l(1 - \alpha = 0,9973)$	3,47	3,41	3,37	3,35	3,33	3,30	3,29
$K_3(1 - \alpha = 0,9973)$	5,82	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
$\eta(1 - \alpha = 0,95)$	1,109	1	1	1	1	1	1

Коэффициент K_T (или T_n) характеризует влияние на точность обработки главным образом случайных факторов, вызывающих разброс, рассеивание размеров деталей (рис. 1.8, а), коэффициент K_c — влияние систематических погрешностей (погрешностей настройки станка, износа инструмента и др.) на смещение поля рассеивания размеров обработки относительно x_0 .

Таблица 1.29

Значения показателей доли q брака, %

$T_n = \frac{1}{K_r}$	$ K_c $						
	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,30	35,8	37,0	37,6	39,8	43,4	48,1	53,6
0,40	23,0	23,4	24,3	28,2	34,3	42,1	50,8
0,50	13,4	13,8	15,1	20,2	28,2	38,5	50,1
0,60	7,19	7,65	9,03	14,6	23,9	36,0	50,1
0,70	3,57	3,98	5,24	10,5	20,1	33,7	50
0,80	1,64	1,95	2,94	7,53	16,8	31,6	50
0,90	0,69	0,90	1,60	5,27	14,1	29,5	50
1,00	0,27	0,40	0,84	3,59	11,5	27,4	50
1,10	0,10	0,16	0,41	2,39	9,34	25,5	50
1,20	0,03	0,06	0,20	1,54	7,49	23,6	50
1,30	0,01	0,02	0,10	0,96	5,94	21,7	50

Различаются фактическое $K_{сф}$ и допустимое $K_{сдоп}$ значения коэффициента смещения K_c . Если в первом приближении допустимая погрешность настройки станка

$$\Delta_{н.доп} = \pm \frac{T - 2\sigma}{2},$$

то

$$K_{сдоп} = \frac{|T - 6\sigma|}{2T}.$$

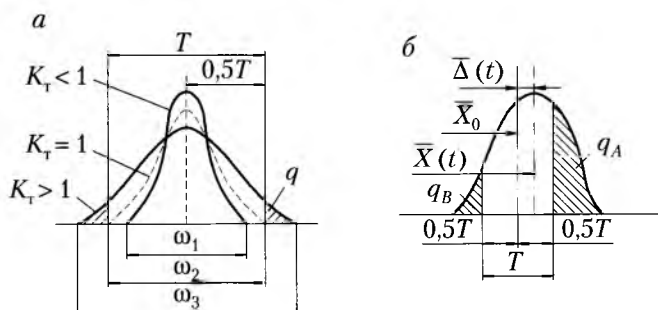


Рис. 1.8. Вероятная доля брака:

a — при отсутствии смещения контролируемого параметра ($K_c = 0$);

б — при наличии смещения ($K_c > 0$)

Если $K_{с.ф} < K_{с.доп}$ (при $K_T < 1$ или $T_n > 1$), то смещение середины поля рассеивания размеров деталей относительно середины поля допуска находится в допустимых пределах, что обеспечивает изготовление только годных деталей. При $K_{с.ф} > K_{с.доп}$ ($K_T < 1$ или $T_n > 1$) смещение центра настройки выходит за допустимые пределы и появляются бракованные детали (зоны q_B и q_A на рис. 1.8, б).

ТС обеспечивает достаточную точность изготовления деталей при соблюдении установленных ГОСТ 27.202–83 условий:

$$K_T K_{T.0} < 1 \text{ (или } T_n > 1);$$

$$K_3(t) > 0 \text{ (или } K_{с.ф} < K_{с.доп}),$$

где $K_{T.0}$ — нормативное (предельное, технически обоснованное) значение K_T .

При фактических значениях T_n и K_c возможная доля q брака деталей в генеральной совокупности может быть определена для равномерного и нормального распределений контролируемого параметра по данным табл. 1.27, а также по табл. 1.29. Во втором случае возможная в данных условиях изготовления деталей доля q брака складывается из доли $q_{сл}$, обусловленной случайными погрешностями обработки, и доли $q_{сист}$, вызванной систематическими погрешностями. Значение $q_{сл}$ находится по табл. 1.29 при $|K_c| = 0$.

Пример. Для выборки, подчиняющейся нормальному распределению ($T_n = 0,6$; $K_T = 1,7$, $|K_c| = 0,05$), необходимо по табл. 1.28 определить процент возможного брака и его составляющие.

По таблице, при $T_n = 0,6$ и $|K_c| = 0,05$: $q = 7,65 \%$, а при $|K_c| = 0$ и $T_n = 0,6$: $q_{сл} = 7,19 \%$. Далее вычисляется $q_{сист} = q - q_{сл} = 7,65 - 7,19 = 0,46 \%$.

При анализе точности обработки желательно определение составляющих общей погрешности обработки, т.е. случайных и систематических (постоянных и переменных) погрешностей. Выявление структуры общей погрешности увеличивает возможности разработки наиболее эффективных и конкретных мероприятий по ее уменьшению. Решение этой задачи облегчается при знании типа точности процесса, определяемого по виду характерной для него точечной диаграммы (рис. 1.9). В первом приближении тип точности процесса может быть установлен по внешнему виду точечной диаграммы, построенной по результатам всех мгновенных

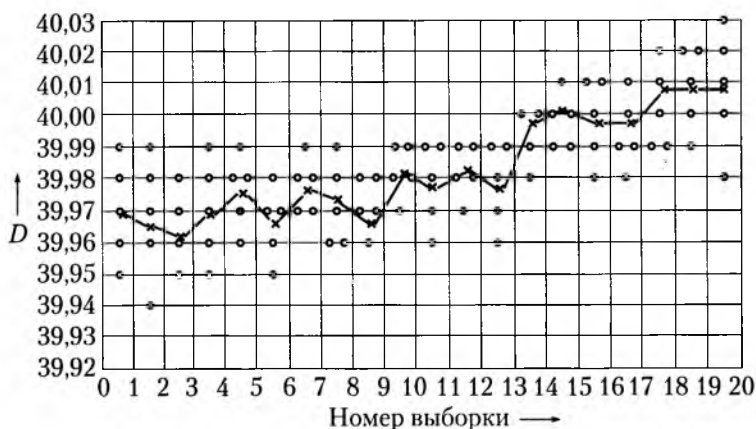


Рис. 1.9. Построение точечной диаграммы

выборок, входящих в данную объединенную выборку. Вначале необходимо оценить случайность объединенной выборки, т.е. убедиться в стабильности центра рассеивания погрешностей обработки в процессе отбора выборки. Случайность выборки может быть оценена методом последовательных разностей [17]. В случае положительного результата этой проверки процесс может быть отнесен к IV типу точности, для которого суммарная погрешность обработки

$$\Delta = \Delta_{\text{п}} + \Delta_{\text{с}}, \quad (1.54)$$

где $\Delta_{\text{п}}$ — постоянная погрешность; $\Delta_{\text{с}}$ — случайная погрешность, определяемая, как величина ω по табл. 1.27 и 1.28.

Фактическое значение постоянной погрешности $\Delta_{\text{п}}$ определяется для нормального закона распределения исследуемого параметра по следующим формулам [17] при обработке:

□ наружных поверхностей заготовок деталей

$$\Delta_{\text{п}} = \bar{x} - 3\sigma - E_i,$$

□ внутренних поверхностей

$$\Delta_{\text{п}} = E_s - \bar{x} - 3\sigma,$$

где E_i и E_s — соответственно нижнее и верхнее предельные отклонения размеров от номинальных; $\bar{x}$ — среднее отклонение размеров от их номинальных значений.

Случайная погрешность обработки при нормальном распределении контролируемого параметра определяется по формуле

$$\Delta_c = 6\sigma' = 2lS' = 2l\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m S_i^2}{m}}, \quad (1.55)$$

где S_i^2 — дисперсия i -й мгновенной выборки; m — число мгновенных выборок в объединенной выборке.

Постоянная погрешность для рассматриваемого случая при обработке наружной и внутренней поверхностей тел вращения определяется по формулам

$$\begin{aligned} \Delta_n &= a - 3\sigma' - E_i, \quad \Delta_n = E_s - a - 3\sigma' \\ \text{или} \quad \Delta_n &= a - lS' - E_i, \quad \Delta_n = E_s - a - lS'. \end{aligned}$$

Подставляя значения Δ_n , $\Delta_{пр}$, Δ_c в уравнение (1.50) и принимая $K_{пр} = 1,73$ ($K_{пр}^2 = 3$), получим суммарную погрешность соответственно при обработке наружной и внутренней поверхностей тел вращения:

$$\begin{aligned} \Delta &= (a - lS' - E_i) + \frac{1}{K_\Delta} \sqrt{3b^2\tau^2 + 4l^2(S')^2}; \\ \Delta &= (E_s - a - lS') + \frac{1}{K_\Delta} \sqrt{3b^2\tau^2 + 4l^2(S')^2}. \end{aligned}$$

Так как погрешности Δ_n и Δ_c не изменяются во времени, зная допуск T на размер детали, из уравнения (1.50) можно определить резерв точности $\Delta_{пр}$ с учетом переменных погрешностей и продолжительность работы станка без подналадки

$$\Delta_{пр.доп} = \frac{1}{K_{пр}} \sqrt{K_\Delta^2(T + \Delta_n)^2 - \Delta_c^2},$$

$$\text{так как } \Delta_{пр} = b\tau, \quad \tau_{доп} = \frac{\Delta_{пр.доп}}{b}.$$

Ниже рассмотрен упрощенный метод определения слагаемых суммарной погрешности по результатам измерений размеров деталей в выборках.

Для процессов I и IV типов точности

$$\Delta_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^k (x_{i\Pi} - \bar{x}_{i1})}{k},$$

где $x_{i\Pi}$ — заданный центр настройки инструмента в i -й объединенной выборке; $\bar{x}_{i1}$ — среднее значение измеряемого размера в первой мгновенной выборке; k — число замен инструмента во время исследования процесса (обычно $k \geq 2$).

Значения Δ_c для процессов указанных типов определяются соответственно по формулам (1.55) и приведенным в табл. 1.27.

Для процесса I типа точности

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{\sum_{i=1}^k (\bar{x}_{i\max} - \bar{x}_{i\min})}{k},$$

где $x_{i\max}$, $x_{i\min}$ — соответственно наибольшее и наименьшее средние групповые значения измеряемого размера; их разность определяется для всего периода работы каждого примененного инструмента при наличии направленной нарастающей или убывающей по времени погрешности.

Суммарная погрешность для процессов I и IV типов точностей определяется по формулам (1.50) и (1.54).

Таким образом, основными этапами статистической оценки технологического процесса являются:

- 1) планирование испытаний, включающее выбор показателей точности и измерительных средств, определение условий и порядка отбора выборок деталей и объема каждой выборки;
- 2) отбор выборок, измерение параметров;
- 3) вычисление статистических характеристик, а также доверительных интервалов для значений $\bar{x}$ и S ;
- 4) анализ вида распределения изучаемого показателя точности с учетом приведенных выше рекомендаций;
- 5) расчет показателей точности по изложенной методике;
- 6) определение типа точности изучаемого процесса;
- 7) определение общей погрешности обработки и ее составляющих, оценка технологического допуска T_p , при котором возможная доля брака не превысит заданного значения (обычно 0,27 %);

8) анализ полученных результатов, построение графических зависимостей и разработка мероприятий по повышению точности изготовления деталей.

1.4.5. Статистические методы исследований и оценки влияния факторов на точность и стабильность обработки

Важнейшим этапом анализа точности деталей является статистическая оценка стабильности технологического процесса. Она производится по результатам измерений показателей качества в мгновенных выборках. Нестабильность технологического процесса обычно проявляется в существенном изменении дисперсии мгновенного распределения контролируемого параметра S_i^2 и его среднего арифметического $\bar{x}_i$ за период между настройками. Для проверки наличия таких изменений и оценки их достоверности используется ряд показателей и различные методы проверки их значимости.

К основным показателям стабильности технологического процесса относятся:

□ коэффициент межнастроечной стабильности, характеризующий изменение рассеивания размеров деталей в течение межнастроечного периода:

$$K_{\text{м.с}} = \frac{S_m}{S_1}, \quad (1.56)$$

где S_1, S_m — средние квадратические отклонения контролируемого параметра соответственно в первой и последней мгновенной выборках;

□ коэффициент смещения центра поля рассеивания, обусловленного влиянием переменной систематической погрешностью обработки,

$$K_{\text{ц}} = \frac{\bar{x}_m - \bar{x}_1}{T},$$

где $\bar{x}_1, \bar{x}_m$ — средние значения контролируемого параметра соответственно в первой после предыдущей настройки и последней перед новой настройкой мгновенных выборках.

Оценка существенности расхождения между значениями S_1^2 и S_m^2 производится с помощью критерия Фишера F_p :

$$F_p = \frac{S_1^2}{S_m^2}.$$

В числителе записывается наибольшая из двух сравниваемых дисперсий, в знаменателе — наименьшая. Вычисленное эмпирическое значение F_p сравнивается с критическим $F_{кр}$ (см. табл. 1.6) для степеней свободы $f_1 = n_1 - 1$, $f_2 = n_m - 1$ (n_1 , n_m — объемы выборок, из которых были определены соответственно значения S_1^2 и S_m^2). Если $F_p < F_{кр}$, можно утверждать, что с заданной вероятностью расхождения между S_1^2 и S_m^2 несущественны и процесс является стабильным по S^2 ; в противном случае расхождения между S_1^2 и S_m^2 следует считать существенными.

Если критерий Фишера позволяет оценить значимость расхождения лишь между двумя дисперсиями, то с помощью критерия Кохрена (см. табл. 1.4) можно сравнить одновременно дисперсии контролируемого параметра во всех m мгновенных выборках, оценить их однородность (методику применения критерия Кохрена см. § 1.2).

Оценка достоверности значения $K_{ц}$ может быть проведена с помощью критерия Стьюдента (см. табл. 1.2). Применение этого метода обосновано лишь в случае, когда расхождение между дисперсиями контролируемого параметра несущественно или исходя из специфики технологического процесса можно сделать предположение об их равенстве. При использовании этого метода определяется

$$t_{на} = \frac{|\bar{x}_k - \bar{x}_l|}{\sqrt{n_k S_k^2 + n_l S_l^2}} \sqrt{\frac{n_k n_l (n_k + n_l - 2)}{n_k + n_l}}, \quad (1.57)$$

где $\bar{x}_k$, $\bar{x}_l$ — средние значения исследуемого параметра соответственно в k -й и l -й мгновенных выборках; S_k , S_l — средние квадратические отклонения параметра в тех же выборках; n_k , n_l — объем тех же выборок.

По значениям $t_{на}$ и f ($f = n_k + n_l - 2$) по [17] определяется вероятность P . Если P больше 0,99; 0,95; 0,9, то сравниваемые значения контролируемого параметра в выборках отличаются несущественно,

процесс является стабильным по $\bar{x}_i$ и показатель смещения центра рассеивания можно считать с определенной вероятностью достоверным.

Пример [13]. На токарном полуавтомате производится чистовое обтачивание и подрезание шеек вала диаметром $D = 40,05_{-0,10}^{+0,15}$ мм. Штучное время $t_{шт} = 2$ мин, основное время $t_0 = 1,5$ мин, межнастроечный период, или период стойкости инструмента, $T = 300$ мин. Требуется оценить стабильность операции обтачивания.

Для решения этой задачи отобраны 100 деталей, изготовленных за межнастроечный период. Объем n мгновенной выборки 5 деталей, отбор производился через 20 мин работы (через каждые 10 изготовленных деталей). Результаты измерений нанесены на диаграмму (см. рис. 1.9). Показатели стабильности для первой и последней (20-й) выборки:

$$K_{м.ч} = \frac{0,215}{0,0172} = 1,25;$$

$$K_{н.ч-20} = \frac{40,01 - 39,37}{0,1} = 0,4.$$

Для оценки достоверности полученных результатов вычисляется

$$F_{p1-20} = \frac{0,215^2}{0,0172^2} = \frac{0,00046}{0,00030} = 1,53.$$

При $f_1 = f_2 = 4$: $F_{кр} = 6,4$ (табл. 1.6), следовательно, разность дисперсий рассмотренных выборок незначительна, $F_{p1-20} < F_{кр}$,

$$t_{м.ч-20} = \frac{|40,01 - 39,39|}{\sqrt{5 \cdot 0,00046 + 5 \cdot 0,0003}} \sqrt{\frac{5 \cdot 5(5 + 5 - 0)}{5 + 5}} = 2,9;$$

$$f = 5 + 5 - 2 = 8.$$

Для значений $t_{м.ч} = 2,9$ и $f = 8$ имеем $P = 0,21$ [17]. Поскольку $0,021 < 0,05$, то с вероятностью 0,95 можно считать разницу между $\bar{x}_1 = 39,37$ мм и $\bar{x}_{20} = 40$ мм существенной, а значение $K_{н.ч-20} = 0,4$ недостаточно достоверным.

Анализ точечной диаграммы (см. рис. 1.9) свидетельствует, что скачок x_n произошел в 14-й и последующих выборках. Можно осуществить оценку стабильности технологического процесса на базе 13 выборок, т.е. по 130 обработанным заготовкам, что соответствует $130 \cdot 1,5 = 195$ мин работы инструмента:

$$K_{м.ч-13} = \frac{0,0172}{0,0130} = 1,32; \quad K_{н.ч-13} = \frac{39,98 - 39,97}{0,1} = 0,1;$$

$$F_{p1-13} = \frac{0,0172^2}{0,0130^2} = \frac{0,0003}{0,00017} = 1,77;$$

$$t_{na1-13} = \frac{|39,39 - 39,97|}{\sqrt{5 \cdot 0,00017 + 5 \cdot 0,0003}} \sqrt{\frac{5 \cdot 5(5 + 5 - 2)}{5 + 5}} = 0,92.$$

Так как $F_{p1-13} < F_{кр}(1,77 < 6,4)$, то разность дисперсий рассмотренных выборок несущественна.

Для $t_{me} = 0,92$ и $f = 8$ имеем $P = 0,393$ [17], следовательно, разница между $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_{13}$ является несущественной с вероятностью $P > 0,99$, а значение $K_{ш-20} = 0,1$ можно считать достоверным.

Таким образом, операция технологического процесса обеспечивает в межнастрочный период $T = 300$ мин стабильность рассеивания размеров, но не обеспечивает уровня настройки; в целях обеспечения стабильности операции одновременно по рассеиванию размеров и по сохранению уровня настройки следует либо откорректировать режим резания для обеспечения работы без поднастройки в течение 300 мин, либо уменьшить межнастрочный период до 200 мин.

Ниже в дополнение к ранее рассмотренным приведены еще три статистических метода исследования влияния различных факторов на точность и стабильность обработки заготовок [13].

Метод статистической проверки гипотез. При осуществлении мероприятий по совершенствованию средств технологического оснащения и структуры технологического процесса, направленных на улучшение качества продукции, возникают задачи оценки их эффективности. Объективная оценка эффективности внедряемых мероприятий заключается в раздельной проверке существенности различия между средними квадратическими отклонениями (S_1, S_2) и средними арифметическими значениями ($\bar{x}_1, \bar{x}_2$) измеряемого признака качества до ($S_1, \bar{x}_1$) и после ($S_2, \bar{x}_2$) внедрения мероприятия. Такая проверка может осуществляться методом статистической проверки гипотез в следующей последовательности:

□ выдвигается первоначальная (нулевая) гипотеза, которая обычно заключается в том, что обе выборки принадлежат одной генеральной совокупности и расхождение между ними несущественно и случайно;

□ для проверки гипотезы вычисляются различные критерии при предварительно выбранном уровне значимости α , который в практике анализа технологического процесса часто равен 0,05;

□ полученное значение критерия сравнивается с допустимым при данном уровне значимости. Если значение критерия не превосходит допустимого, то это означает, что наблюдения не противоречат начальной гипотезе. И наоборот.

Статистические приемы проверки гипотез не обладают полной определенностью. В результате на основе указанных факторов можно только считать, что опытные данные не противоречат нулевой гипотезе или, наоборот, противоречат. И только более обстоятельные исследования, анализ физической сущности изучаемого явления могут подтвердить намеченные предположения.

Проверка гипотезы равенства двух выборочных средних и выборочных дисперсий может выполняться, когда: а) выборки берутся из нормальной генеральной совокупности; б) выборки принадлежат совокупности, которая не подчиняется нормальному распределению или закон распределения этой совокупности неизвестен. В первом случае оценка расхождения двух выборочных дисперсий производится с помощью критерия Фишера, а оценка расхождения двух выборочных средних — с помощью критерия Стьюдента. Методика применения указанных критериев рассмотрена выше. Формула (1.56) справедлива, если объем каждой выборки (n_1 и n_2) меньше 25. Если $n > 25$, то критерий Стьюдента для сравнения выборочных средних определяется по формуле

$$t_{n\alpha} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2}}, \quad (1.58)$$

а при $n_1 = n_2$

$$t_{n\alpha} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} \sqrt{n}. \quad (1.59)$$

Во втором случае точность оценки расхождения двух выборочных средних снижается. Для оценки этого расхождения также определяется значение $t_{n\alpha}$ по формулам (1.57), (1.58) или (1.59) в зависимости от объема выборок. Если окажется, что $t_{n\alpha} \geq 3$, то можно с большой вероятностью (которая, однако, неизвестна) считать, что величины $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ различаются существенно, в противном случае — не существенно.

Если выборки берутся из совокупностей, незначительно отличающихся от нормальных, при сравнении двух выборочных дис-

персний можно пользоваться F_p -критерием. Но если совокупность имеет распределение, значительно отличающееся от нормального, дисперсии можно сравнивать только для больших выборок. Оценка может производиться с помощью критерия

$$t_{nos} = \frac{|S_2 - S_1|}{\sqrt{S_1^2/(2n_1) + S_2^2/(2n_2)}}.$$

При $t_{nos} \geq 3$ нулевая гипотеза отвергается, при $t_{nos} < 3$ — принимается.

Часто возникает необходимость сравнения выборочных значений $\bar{x}$ и S с исходными $\bar{x}_n$ и S_n , т.е. настроечными или номинальными, определенными ранее. Для решения этой задачи необходимо рассчитать доверительные интервалы для $\bar{x}_n$, S_n . Если значения $\bar{x}$ и S попадают в эти интервалы, то нулевая гипотеза о равенстве в статистическом смысле параметров $\bar{x}$ и $\bar{x}_n$, S и S_n подтверждается. В противном случае эта гипотеза отвергается. Доверительные интервалы для $\bar{x}_n$ и S_n могут быть рассчитаны соответственно по формулам (1.7) и (1.53).

Дисперсионный анализ. Дисперсия значений любого показателя качества при механической обработке зависит от большого числа факторов. Как было показано выше, изменение одних факторов носит систематический характер, других — случайный. Практический интерес представляет оценка существенности влияния различных факторов на устойчивость технологического процесса.

В ряде случаев технологический процесс совершенствуется за счет модернизации оборудования, оснастки, изменения режимов обработки, совмещения методов воздействия на материалы и т.п. При этом необходимо учитывать и оценивать эффективность намечаемых мероприятий, т.е. существенность их вклада в изменение дисперсии значений рассматриваемого признака качества. Решение указанных двух типов задач возможно путем использования дисперсионного анализа.

Дисперсионным анализом называется изучение переменных факторов по их дисперсиям. В первую очередь вычисляется составляющая S_A^2 общей дисперсии, обусловленная влиянием фактора A , и составляющая S_ϵ^2 , вызванная влиянием случайных факторов, или дисперсия воспроизводимости. Оценка существенности расхождения между ними с помощью критерия F_p дает возможность

сделать вывод о роли фактора A в изменении общей дисперсии. Это по сути схема однофакторного дисперсионного анализа, методика осуществления которого приведена ниже. Дисперсионный анализ может использоваться также для оценки влияния нескольких факторов и их взаимосвязей на изменение результирующего признака, для планирования эксперимента, например в случае дробного факторного плана, при решении других задач [18].

Методика однофакторного дисперсионного анализа технологического процесса заключается в следующем. Для оценки влияния фактора A необходимо его измерить на p уровнях и на каждом уровне сделать n измерений исследуемого признака качества. При числе наблюдений на каждом уровне фактора, равном n , общее их число $N = np$. Значение признака качества обозначается x_{ij} (i — номер уровня фактора, j — номер наблюдения). Распределение значений признака качества по уровням одного фактора представлено в табл. 1.30.

Таблица 1.30

Значения признака качества по уровню фактора A и их сумма

Уровень фактора A	Значение признака качества при наблюдении							Сумма T_i по уровню	Среднее арифметическое значение $\bar{x}_i$ по уровню
	1	2	3	...	j	...	n		
1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	...	x_{1j}	...	x_{1n}	$\sum x_{1j}$	$\bar{x}_1$
2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	...	x_{2j}	...	x_{2n}	$\sum x_{2j}$	$\bar{x}_2$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
i	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	...	x_{ij}	...	x_{in}	$\sum x_{ij}$	$\bar{x}_i$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
p	x_{p1}	x_{p2}	x_{p3}	...	x_{pj}	...	x_{pn}	$\sum x_{pj}$	$\bar{x}_p$
								$\sum x_{ij} = T_i$	

Для данного уровня фактора A отклонение значения признака качества x_{ij} от общего среднего арифметического значения $\bar{x}$ связано с действием на данный признак качества фактора A , т.е.

$$x_{ij} - \bar{x} = A_i + \varepsilon_{ij},$$

где $\bar{x}$ — общее среднее арифметическое значение признака по результатам $N = np$ наблюдений; A_i — эффект, обусловленный дей-

ствием фактора A i -го уровня; ε_{ij} — остаточное отклонение, не зависящее от рассматриваемого фактора, обусловленное действием неконтролируемых факторов на признак качества.

Анализируя данные табл. 1.30, можно выделить три типа рассеивания признака качества:

□ рассеивание значений признака качества x_{ij} относительно общего среднего арифметического значения $\bar{x}$, характеризующее суммарной дисперсией

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \left(\sum_{i,j} x_{ij}^2 - \frac{T^2}{N} \right),$$

где $N-1$ — число степеней свободы для общей дисперсии S^2 ;

□ рассеивание средних арифметических значений признака качества по каждому уровню фактора $\bar{x}_i$ относительно общего среднего арифметического значения $\bar{x}$, обусловленное влиянием фактора A и характеризующееся дисперсией

$$S_{Ai}^2 = \frac{1}{p-1} \left(\sum_i \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{N} \right), \quad (1.60)$$

где $p-1$ — число степеней свободы для дисперсии S_{Ai}^2 ; n_i — среднее число значений признака качества по каждому уровню фактора; если число значений признака качества по всем уровням одинаково, то $n_i = n$;

□ рассеивание значений признака x_{ij} относительно среднего арифметического значения $\bar{x}_i$ по каждому уровню фактора, обусловленное влиянием случайных факторов и характеризующееся дисперсией

$$S_{\varepsilon_{ij}}^2 = \frac{1}{N-p} \left(\sum_{i,j} x_{ij}^2 - \sum_i \frac{T_i^2}{n_i} \right), \quad (1.61)$$

где $N-p$ — число степеней свободы для дисперсии $S_{\varepsilon_{ij}}^2$; n_i — число значений признака $S_{\varepsilon_{ij}}$.

Схема однофакторного дисперсионного анализа приведена в табл. 1.31.

Таблица 1.31

Однофакторный дисперсионный анализ

Источник изменчивости признака качества	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия
Различия между уровнями	$\sum \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{n}$, здесь n — число наблюдений (измерений) на каждом уровне фактора	$p - 1$	$\frac{1}{p - 1} \left(\sum \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{N} \right)$
Различия внутри уровней	$\sum_{i,j} x_{ij}^2 - \sum \frac{T_i^2}{n_i}$	$N - p$	$\frac{n}{N - p} \left(\sum_{i,j} x_{ij}^2 - \sum \frac{T_i^2}{n_i} \right)$
Общее (сумма)	$\sum_{i,j} x_{ij}^2 - \frac{T^2}{n}$	$N - 1$	—

Результаты расчетов значений величин, приведенных в табл. 1.30, заносят в аналогичную таблицу. Значения $\sum_i T_i^2$, T^2 , $\sum_{i,j} x_{ij}^2$ определяют по данным табл. 1.31.

Завершением анализа служит сравнение дисперсий $S_{A_i}^2$ и $S_{\varepsilon_{ij}}^2$ с помощью критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S_{A_i}^2}{S_{\varepsilon_{ij}}^2}. \quad (1.62)$$

При уровне значимости $\alpha = 0.05$ в зависимости от числа степеней свободы для каждой дисперсии (указаны в табл. 1.31) находят значения $F_{кр}$ (см. табл. 1.6). Если $F_p \geq F_{кр}$, то различие между дисперсиями $S_{A_i}^2$ и $S_{\varepsilon_{ij}}^2$ существенно, т.е. фактор A влияет на признак качества готовых изделий. В этом случае для обеспечения повышения точности обработки необходимо выбрать такой уровень исследуемого фактора, которому соответствует наименьшая дисперсия. Если $F_p < F_{кр}$, то различие между дисперсиями случайное, что свидетельствует об отсутствии влияния искомого фактора на рассматриваемый признак качества. Применение критерия F_p рекомендуется при $p(n - 1) \geq 10$.

Пример [13]. Необходимо выполнить анализ хода процесса растачивания отверстий $\varnothing 75^{+0,06}$ в шестернях на настроенном токарном станке. Определить, существенно ли смещение центра поля рассеивания размеров деталей во времени, т.е. наличие систематической переменной погрешности.

Из партии обрабатываемых заготовок деталей через равные промежутки времени образовано 5 текущих выборок по 6 заготовок деталей в каждой (табл. 1.32).

Таблица 1.32

Показатели пяти выборок

Номер выборки	Отклонение диаметра отверстия от номинального для детали, мкм						T_i	T_i^2	$\sum x_i^2$	$\bar{x}$
	1	2	3	4	5	6				
1	40	39	42	33	40	41	235	55 225	9 255	39,2
2	40	40	43	39	40	41	243	59 049	9 851	40,5
3	41	41	44	35	41	36	238	56 664	9 500	39,7
4	40	41	45	41	42	43	252	63 504	10 600	42
5	57	43	48	49	47	47	291	84 681	14 221	48,5

$$T = 1259; \quad \sum_i T_i^2 = 319\,103; \quad \sum_{i,j} x_{ij}^2 = 53\,427; \quad \bar{x} = 42.$$

Для определения различия между уровнями (выборками) вычисляется

$$\sum_i \frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{N} = \frac{319\,103}{6} - \frac{1259^2}{5 \cdot 6} = 348.$$

Число степеней свободы $p - 1 = 5 - 1 = 4$; значение дисперсии [формула (1.60)] $S_{\Delta}^2 = 348/4 = 87$.

Для определения различия внутри уровней (в выборках) вычисляются:

- разность: $\sum_{i,j} x_{ij}^2 - \sum_i \frac{T_i^2}{n} = 53\,427 - \frac{319\,103}{6} = 243$;

- число степеней свободы: $N - p = 5 \cdot 6 - 5 = 25$;

- дисперсия [формула (1.61)]: $S_{\text{вн}}^2 = 243/25 = 9,72$.

Результаты расчета сводятся в таблицу, аналогичную табл. 1.32.

По формуле (1.62) находим критерий Фишера $F_p = 87/9,72 = 8,95$. Для $\alpha = 0,05$ и чисел степеней свободы 4 и 25: $F_{\text{кр}} = 2,76$ (см. табл. 1.6). Так как $8,95 > 2,76$, расхождение между средними значениями диаметра отверстия в деталях для отдельных выборок существенно, т.е. имеет место систематическая погрешность технологического процесса, обуславливающая смещение во времени центра поля рассеивания рассматриваемого признака.

Зная продолжительность работы станка между взятием выборок и выборочные значения $\bar{x}_p$, можно определить интенсивность смещения центра поля рассеивания и соответствующим образом настроить оборудование.

Анализ временных рядов и случайных последовательностей. Обычно решаются две задачи анализа точности изготовления деталей. Первая связана с оценкой фактической точности обработки и сравнением ее с допустимой для прогнозирования качества продукции. Методы решения таких задач отражены выше. Вторая задача связана с изучением механизма образования погрешностей, созданием математической модели процесса обработки в отношении точности с целью использования этой информации для корректирования процесса или оптимизации отдельных его элементов. Ниже рассмотрены вопросы решения второй задачи с применением статистических методов.

Если при решении первой задачи на базе статистических методов процессы обработки изучаются на уровне случайных величин, то при решении второй задачи — на уровне случайных функций.

Случайной функцией $X(t)$ называется функция неслучайного аргумента t , которая в опыте может принять неизвестный заранее тот или иной конкретный вид. Этот вид случайной функции в конкретном опыте называется ее реализацией $x(t)$. При выполнении n независимых опытов образуется n реализаций $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$. Если аргумент t является непрерывной величиной (допустим, время), то $x(t)$ называется случайным процессом; если t — дискретная величина (например, номер детали в выборке), то $X(t)$ называется случайной последовательностью. При фиксированном значении $t = t_0$ случайная функция $X(t)$ превращается в случайную величину $X(t_0)$, именуемую сечением случайной функции. О свойствах случайных функций можно судить по внешнему виду их реализаций.

Пучок реализаций 1–4 на рис. 1.10, а дает возможность предположить, что свойства случайной функции являются как бы устойчивыми во времени. Другая картина наблюдается на рис. 1.10, б. Но подобно тому как статистический ряд, получаемый в серии опытов для определения свойств случайной величины, только приближенно характеризует эту величину, так и пучок реализаций случайной функции может характеризовать ее свойства только с той или иной степенью приближения. Если для описания случайной величины достаточно знать ее математическое ожидание и дис-

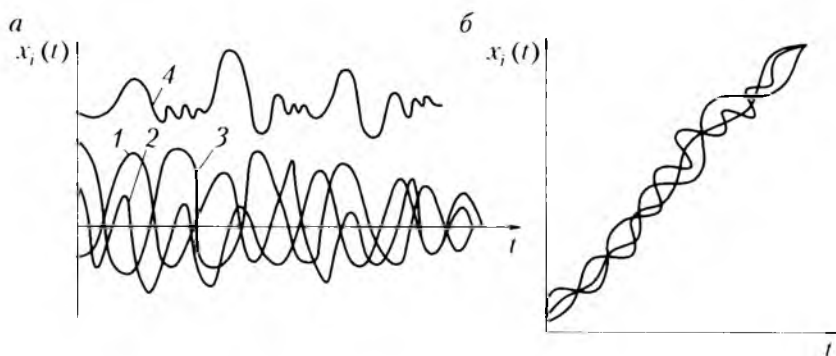


Рис. 1.10. Возможные реализации случайных функций

персию, то для описания случайной функции используются три характеристики: математическое ожидание $MX(t)$; дисперсия $D_x(t)$ и корреляционная функция $K_x(t', t'')$.

Математическим ожиданием случайного процесса $X(t)$ называется неслучайная функция $MX(t)$, значение которой при каждом значении $t = t_0$ равно математическому ожиданию $MX(t_0)$ той случайной величины $X(t_0)$, которая отвечает этому значению параметра.

Дисперсия случайного процесса $X(t)$ — неслучайная функция $D_x(t)$, значение которой при каждом значении $t = t_0$ равно дисперсии $D_x(t_0)$ той случайной величины $X(t_0)$, которая отвечает этому значению параметра.

Корреляционной (автокорреляционной) функцией называется неслучайная функция двух аргументов $K_x(t', t'')$, которая при каждой паре значений аргументов t', t'' равна корреляционному моменту соответствующих значений случайной функции:

$$K_x(t', t'') = M \{ [X(t') - MX(t')] [X(t'') - MX(t'')] \}.$$

Величины t' и t'' принимают все возможные значения параметра t . При $t' = t''$ корреляционная функция превращается в дисперсию $D_x(t)$ случайной функции.

Нормированной корреляционной функцией называется коэффициент корреляции сечений $X(t')$ и $X(t'')$:

$$r_x(t', t'') = \frac{K_x(t', t'')}{\sigma_x(t')\sigma_x(t'')} = \frac{K_x(t', t'')}{\sqrt{D_x(t')D_x(t'')}}.$$

При анализе точности обработки необходимо вначале выявить тип точности (см. п. 1.4.1) или характер ее изменения во времени. Решение этой задачи достигается благодаря анализу совокупности значений изучаемого показателя, расположенных в последовательности обработки, как случайной последовательности. При этом следует оценить стационарность случайной последовательности.

Стационарный процесс характеризуется постоянными математическим ожиданием и дисперсией, а также корреляционной функцией, зависящей только от разности аргументов $\tau = t'' - t'$:

$$MX(t) = MX = \text{const};$$

$$D_x(t) = D_x = \text{const};$$

$$K_x(t', t'') = K_x(t'' - t') = K_x(\tau).$$

Методика проверки стационарности случайной последовательности изложена в гл. 2. Изображенный на рис. 1.10, *а* случайный процесс является стационарным, на рис. 1.10, *б* — нестационарным.

При анализе точности обработки часто приходится рассматривать не семейства реализаций, а отдельные реализации. Вероятно, что получаемые при этом заключения можно распространять на аналогичные ситуации лишь в том случае, если все реализации, обеспечиваемые при нормально одинаковых условиях, статистически равноценны. О статистической равноценности разных реализаций одной и той же последовательности (процесса) можно судить по результатам проверки гипотезы о ее (его) эргодичности.

Эргодичность — это свойство изменяющейся (динамической) системы, состоящее в том, что в процессе эволюции системы почти каждая точка ее с определенной правильностью проходит вблизи любой другой точки системы. Стационарный процесс эргодичен, если вероятность любого его стационарного подмножества равна 0 или 1.

Стационарная случайная функция относится к эргодической, т.е. обладает эргодическим свойством, если ее характеристики (математическое ожидание, корреляционная функция и дисперсия) могут быть рассчитаны как соответствующие средние по времени для одной реализации большой продолжительности. По сути эргодичность характеризует способность процесса к воспроизведению своих характеристик в различных реализациях. Достаточное усло-

вис эргодичности стационарной случайной функции (по математическому ожиданию)

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} K_x(\tau) = 0 \quad (1.63)$$

справедливо и для нормированной корреляционной функции $r_x(\tau)$. Кроме того, условием эргодичности процесса является постоянство в статистическом смысле значений MX и D_x для различных реализаций:

$$MX_j = MX = \text{const}; \quad D_{xj} = D_x = \text{const},$$

где j — номер реализации.

Показанные на рис. 1.10, *a* реализации 1, 2, 3 обладают эргодическим свойством, реализация 4 по отношению к ним не является эргодичной.

Проверка эргодичности процесса обработки может осуществляться в такой последовательности [13]:

1) на одном станке в характерных для него нормальных условиях производится обработка k партий заготовок в межнастроечный период ($k = 3 \dots 5$). Желательно одинаковое число заготовок в партиях (50...200 шт.);

2) по результатам измерений размеров деталей производится графическое построение полученных реализаций случайных последовательностей изучаемого показателя точности в порядке обработки. Визуальный анализ этих графиков позволяет предварительно оценить эргодичность процесса;

3) для каждой из k реализаций определяются величины $\bar{x}_j$, S_{xj}^2 , $r_x(\tau)_j$, а для всей совокупности значений рассматриваемого параметра в k партиях заготовок деталей рассчитываются значения $\bar{x}$, S_x^2 , $\bar{S}_x^2$.

$$\begin{aligned} \bar{x}_j &= \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_i; \quad S_{xj}^2 = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (x_i - \bar{x}_j)^2; \\ r_x(\tau)_j &= \frac{K_x(t', t'')_j}{\sqrt{D_x(t')_j D_x(t'')_j}}; \\ \bar{x} &= \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{x}_j; \quad S_x^2 = \frac{1}{f} \sum_{j=1}^k f_j S_{xj}^2; \end{aligned} \quad (1.64)$$

$$f = \sum_{j=1}^k f_j; \quad f_j = n_j - 1,$$

где i — номер детали; n_j — число деталей в j -й реализации;

$$\bar{n} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k n_j;$$

4) с помощью критерия Кохрена определяется, являются ли значения s_{ij}^2 оценками одной и той же генеральной дисперсии [формула (1.24)]. Если $G_p < G_{кр}$ (см. табл. 1.4), то нулевую гипотезу можно принять, а расхождение между дисперсиями считать незначительным;

5) с помощью критерия Фишера $F_p = \bar{S}_x^2 / S_x^2$ подвергается проверке гипотеза: являются ли значения x_j оценками одной и той же генеральной средней. Если $F_p \leq F_{p1-p(k-1, \bar{n}k-k)}$, то нулевая гипотеза о равенстве всех генеральных средних в совокупности справедлива;

6) по формуле (1.64) рассчитываются значения $r_x(\tau)_j$ и по характеру их изменения определяется, соблюдается ли условие (1.63).

В источнике [13] описан выполненный М.М. Кане анализ стационарности и эргодичности процессов зубофрезерования и шевингования прямозубых цилиндрических зубчатых колес в производственно-лабораторных условиях по 13 показателям точности зубчатого венца. Установлено, что указанные процессы в рассмотренных условиях являются стационарными и эргодическими. Значит, математические модели этих процессов с точки зрения формирования рассмотренных показателей точности зубчатого венца могут быть построены с помощью методов корреляционно-регрессионного анализа по одной реализации значительно большей продолжительности за межнастрочный период.

Стационарная случайная функция $X(t)$ имеет каноническое разложение вида:

$$X(t) = MX + \sum_{k=0}^{\infty} [U_k \cos(\omega_k t) + V_k \sin(\omega_k t)], \quad (1.65)$$

где U_k, V_k — центрированные, некоррелированные случайные величины с попарно равными дисперсиями:

$$D(U_k) = D(V_k) = D_k \quad (k = 0, 1, \dots).$$

Центрированной случайной величиной $\dot{X}$, соответствующей случайной величине X , называется отклонение величины X от ее математического ожидания:

$$\dot{X} = X - MX.$$

Разложение (1.65) называется спектральным. Спектральному разложению стационарной случайной функции соответствует разложение в ряд ее корреляционной функции

$$K_x(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} D_k \cos(\omega_k \tau).$$

Дисперсия стационарной случайной функции

$$D_x = K_x(0) = \sum_{k=0}^{\infty} D_k.$$

Спектральной плотностью стационарной случайной функции $X(t)$ называется предел отношения дисперсии, приходящейся на данный интервал частот ω , к длине этого интервала, когда последняя стремится к нулю. Спектральная плотность $S_x(\omega)$ и корреляционная функция $K_x(\tau)$ связаны преобразованием Фурье:

$$S_x(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} K_x(\tau) \cos(\omega \tau) d\tau;$$

$$K_x(\tau) = \int_0^{\infty} S_x(\omega) \cos(\omega \tau) d\omega.$$

Из приведенных выражений следует, что

$$D_x = K_x(0) = \int_0^{\infty} S_x(\omega) d\omega.$$

Нормированной спектральной плотностью называется отношение спектральной плотности к дисперсии случайной функции:

$$s_x(\omega) = \frac{S_x(\omega)}{D_x}.$$

Анализ спектральной плотности случайной последовательности значений показателя точности позволяет выполнить оптимальное разделение суммарной погрешности обработки на систематическую и случайную составляющие [21]. Такой анализ необходим при исследовании

довании подналадочных систем автоматических станков и математическом описании объектов управления. Ниже приведено краткое описание методики такого разделения [13, 21].

Все источники погрешностей обработки можно разделить на две группы. К первой группе относятся те факторы, которые складываются в каждом цикле обработки (при обработке каждой заготовки) случайным, непредсказуемым образом и обуславливают случайную составляющую погрешности размера деталей в данном цикле. Значения этой составляющей $z(t_i)$ в разных циклах обработки независимы и поэтому некоррелированы. Примером этого могут служить случайные колебания припусков и твердости материалов заготовок.

Ко второй группе относятся все систематические факторы, такие как износ инструмента, тепловые деформации ТС, изменение качества СОЖ и т.п. Можно считать, что составляющие $y(t_i)$ отклонений размеров деталей $x(t_i)$, обусловленные факторами второй группы, в разных циклах обработки будут не только зависимыми, но и коррелированными. Взаимосвязь отклонений размеров определяется зависимостью между уровнями факторов, действующих в соседних циклах обработки, либо последствием этих факторов. Таким образом, отклонения размеров последовательно обработанных заготовок рассматриваются как случайная последовательность, состоящая из элементов, разделенных на систематическую $y(t_i)$ и случайную $z(t_i)$ составляющие:

$$x(t_i) = y(t_i) + z(t_i).$$

Систематическая составляющая также может быть разделена на две части:

$$y(t) = F_{\text{п}} + V(t_i),$$

где $F_{\text{п}}$ — постоянная часть погрешности, $V(t_i)$ — закономерно изменяющаяся во времени погрешность [21].

Дисперсию величины $z(t_i)$ — части общей дисперсии рассматриваемого показателя точности — можно считать величиной, имеющей чисто случайный характер. Поэтому дисперсию для мгновенного (малого) распределения можно вычислить по выражению

$$D_z = 2\pi S_z(\omega) = 2\pi \min S_x(\omega), \quad (1.66)$$

где $\min S_x(\omega)$ — минимальное значение спектральной плотности исследуемой случайной функции.

При нормированной спектральной плотности $s_x(\omega)$ формула (1.66) приводится к виду

$$D_z = 2\pi \min s_x(\omega) D(x). \quad (1.67)$$

По закону сложения дисперсий,

$$D_x = D_z + D_y,$$

откуда по известному значению D_z нетрудно определить значение D_y .

Расчет величины $S_x(\omega)$ можно осуществлять посредством ЭВМ или по рекомендациям источника [21].

Применение наглядных графических материалов в исследовании точности оборудования рассмотрим на примере. Допустим, необходимо исследовать точность внутришлифовального станка, оснащенного прибором активного контроля. Для реализации случайного процесса принята случайная последовательность $x(t)$ результатов измерений 120 обработанных на станке заготовок деталей (рис. 1.11, а).

В ходе вычислений из исходной случайной последовательности были исключены резко выделяющиеся значения и доказана стационарность рассматриваемого процесса. Необходимо разложить дисперсию погрешностей обработки за время бесподналадочной работы станка на составляющие, обусловленные систематическими и случайно действующими факторами. С этой целью рассчитаны нормированные значения автокорреляционной функции и спектральной плотности (табл. 1.33):

Таблица 1.33

Значения автокорреляционной функции и спектральной плотности

$r_1(\tau)$, мкм ²	τ , цикл	$S_1(\omega)$, мкм ²	ω , 1/цикл
1.0	0	0.18	0
0.75	1	0.08	$\pi/6$
0.53	2	0.06	$\pi/3$
0.32	3	0.015	$\pi/2$
0.18	4	0.012	$2\pi/3$
0.07	5	0.09	$5\pi/6$
0.02	6	0.12	π

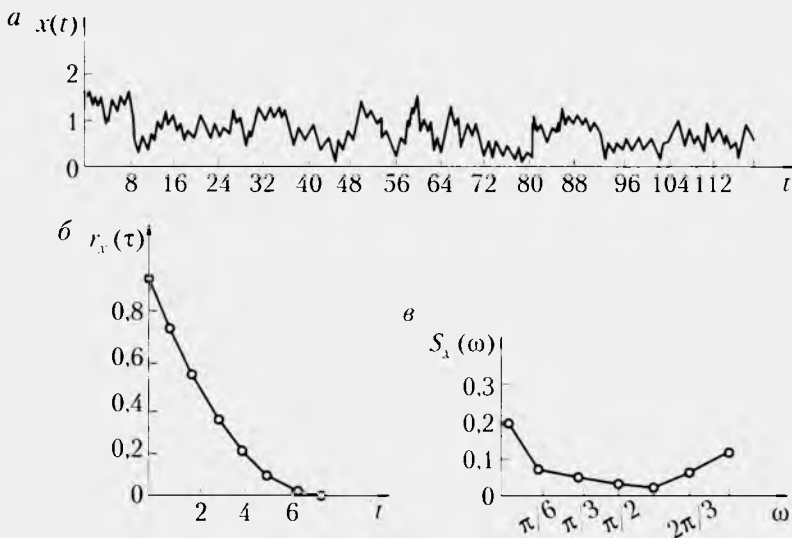


Рис. 1.11. Характеристики временного ряда:

a — случайная последовательность погрешностей $x(t)$, мкм внутреннего диаметра; b — нормированная автокорреляционная функция случайной последовательности $x(t)$; v — нормированная спектральная плотность случайной последовательности $x(t)$

По характеру изменения величины $r_x(\tau)$ видно, что условие (1.63) соблюдено и рассматриваемый процесс эргодический. Это дает возможность наметить пути повышения точности процесса по результатам анализа одной выборки достаточной продолжительности.

Статистические характеристики случайной последовательности: $\bar{x} = 1,12$ мкм, $D_x = 0,043$ мкм².

По минимальному значению нормированной спектральной плотности (0,012) по формуле (1.67) рассчитана составляющая дисперсии погрешности обработки, определяемая случайными факторами: $D_z = 0,0025$ мкм². Как видно из расчета, случайная составляющая дисперсии погрешности составляет лишь небольшую часть общей дисперсии, что дает основание признать эффективным применение системы автоматического управления точностью обработки за счет стабилизации систематических погрешностей. Для наглядности и анализа по данным исследования построены

также графики нормированных автокорреляционной функции и спектральной плотности случайной последовательности $x(t)$ (рис. 1.11, б, в).

1.4.6. Особенности формирования статистического ряда, его графического представления и математической оценки

Контроль качества продукции с охватом 100 % деталей и изделий связан с огромными затратами времени и средств. Поэтому в основу управления качеством на современном этапе развития машино- и приборостроения лежат математико-статистические методы. Для их использования необходимы статистические данные по параметрам качества деталей и изделий. Эти данные практически всегда являются случайными величинами, фактические значения которых предсказать практически невозможно.

Сбор и обработка статистических данных осуществляется на основе выборочного метода, когда по результатам контроля выборки из партии или из всей совокупности судят о качестве изделий партии, совокупности. Если при этом показано хорошее соответствие качества выборки и генеральной совокупности, то такая выборка называется *представительной*.

В отношении качества технологического процесса выборки могут быть повторные и бесповторные, пристрастные (преднамеренность выбора) и случайные, единовременные и текущие, производственные (производственный процесс, несколько линий) и одноагрегатные (одно рабочее место, один станок).

Если по статистическим характеристикам необходимо сделать вывод о числовых параметрах генеральной совокупности, то предпочтительней является выборка большего объема, состоящая из нескольких мгновенных выборок с охватом большего промежутка времени. Тогда представление о качестве процесса формообразования деталей, т.е. всей совокупности, будет более полным и информативным.

Допустим, имеются результаты наблюдений над случайной величиной X , т.е. ряд значений измерения параметра (показателя) в выборке. Такой ряд подвергается упорядочению и спецобработке с использованием ЭВМ. Сначала он перестраивается по убываю-

щему или возрастающему значению параметра, затем отражается частота (частота) повторения значения.

В табл. 1.34 приведены результаты измерения вольтметром с ценой деления 1 В критического напряжения U , при котором наблюдается пробивка диэлектрика (прослойки изолятора).

Таблица 1.34

Пробивное напряжение изоляторов, В

198	195	186	203	203	191	193	205	184	202
210	181	195	193	202	186	194	199	191	198
199	199	187	203	207	187	195	202	198	200
202	205	194	197	197	193	196	194	181	182
198	193	184	197	190	189	201	196	206	204
197	195	190	203	196	209	202	195	207	183
201	203	189	190	193	198	196	196	196	185
197	193	204	195	195	188	191	188	199	191
194	192	193	186	192	194	184	192	196	200
208	187	200	201	180	192	193	198	189	197

По данной таблице определяются наименьшее и наибольшее значения напряжения U — 180 В и 210 В, и все значения располагаются в порядке возрастания (табл. 1.35). В результате получается упорядоченный статистический ряд с указанием повторяемости (частоты) значений x_i напряжения (контрольный лист).

Числа столбца x_i — это упорядоченный ряд, числа столбца m_i — ряд частот. Таблица 1.35 дает более наглядную картину изменения значений параметра: структуры с $U = 191...200$ В встречаются наиболее часто, а структуры с $U < 180$ В и $U > 210$ В отсутствуют вообще.

Значения m_i дискретны, так как они могут быть только целыми числами. Значения x_i есть величины непрерывные, так как рядом стоящие значения в ранжированном ряду могут отличаться друг от друга на бесконечно малое значение. Например, $U = 196,5$ В и $U = 197,4$ В будут считаться при точности измерения ± 1 В (цена деления 1 В) одним значением $U = 197$ В. Поэтому в рассматриваемом случае измерение непрерывной величины (напряжения) будет интервальным.

Таблица 1.35

Упорядоченный статистический ряд с указанием повторяемости значений напряжения

x_i, B	Повторяемость		x_i, B	Повторяемость	
	Раз (+)	Число m_i		Раз (+)	Число m_i
180	+	1	196	+++++++	1
181	++	2	197	++++++	6
182	+	1	198	++++++	6
183	+	1	199	++++	4
184	++	2	200	++++	4
185	+	1	201	+++	3
186	+++	3	202	+++++	5
187	+++	3	203	+++++	5
188	++	2	204	++	2
189	+++	3	205	++	2
190	+++	3	206	+	1
191	++++	4	207	++	2
192	+++	3	208	+	1
193	+++++++	8	209	+	1
194	++++++	6	210	+	1
195	+++++++	7			

Число классов группирования ранжированного ряда не должно быть слишком большим (невывразительность) и малым (свойства описываются слишком грубо). При большом ряде целесообразно принимать 10–20 классов, но может быть и 5–10.

Длины интервалов (ширина классов) для упрощения чаще всего принимаются одинаковыми. Для одинаковых длин интервалов ширина классов может определяться по выражению

$$|x_i, x_{i+1}| = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{k}, \quad (1.68)$$

где x_i, x_{i+1} — границы i -го класса; $x_{i\max}, x_{i\min}$ — максимальное и минимальное значения для x_i ; k — число классов.

В случае неодинаковой ширины классов, а также для обеспечения наглядности оценки ряда удобно пользоваться не абсолютной

частотой m_i , а относительной. Относительная частота α_i является отношением абсолютной частоты m_i к общему числу наблюдений n :

$$\alpha_i = \frac{m_i}{n}. \quad (1.69)$$

Приведенное в табл. 1.35 распределение имеет 31 интервал, каждый в 1 В. Для интервального ряда желательным является уменьшение числа интервалов. Для этого можно их объединить и сделать ширину интервалов по 3 В.

Существует три способа объединения интервалов (табл. 1.36).

Таблица 1.36

Способы объединения интервалов

Первый способ			Второй способ			Третий способ		
Середина интервалов		Σm_i	Середина интервалов		Σm_i	Середина интервалов		Σm_i
180	181	4	179	180	3	178	179	1
181			180			179		
182			181			180		
183	184	4	182	183	4	181	182	4
184			183			182		
185			184			183		
186	187	8	185	186	5	184	185	6
187			186			185		
188			187			186		
и т.д.			и т.д.			и т.д.		

Во втором и третьем способах к значению 180 подключается еще одно или два несуществующих в ряде значений (частоты этих значений $m_i = 0$). Тогда, например, при использовании третьего способа объединения в рассматриваемом случае имеет место интервальный ряд с числом классов $k = 11$ шириной 2,82 В. Дробный по значению интервал не может иметь место. Поэтому принимается третий способ укрупнения ряда (табл. 1.37).

Для наглядного представления тенденции изменения наблюдаемых явлений используются графические методы. Наиболее распространенными графическими изображениями (графиками) являются полигон, гистограмма, кумулятивная кривая (кумулята).

Таблица 1.37

Укрупненный интервальный ряд и его характеристики

Интервал значений (класс), В	Середина интервала, В	Частота m_i	Относительная частота ω_i	Накопленная частота Σm_i	Накопленная относительная частота $\Sigma \omega_i$
177.5...180.4	179	1	0.01	1	0.01
180.5...183.4	182	4	0.04	5	0.05
183.5...186.4	185	6	0.06	11	0.11
186.5...189.4	188	8	0.08	19	0.19
189.5...192.5	191	10	0.10	29	0.29
192.5...195.4	194	21	0.21	50	0.50
195.5...198.4	197	19	0.19	69	0.69
198.5...201.4	200	11	0.11	80	0.80
201.5...204.4	203	12	0.12	92	0.92
204.5...207.4	206	5	0.05	97	0.97
207.5...210.4	209	3	0.03	100	1.00

Полигоны обычно используются для дискретных и приравненных к ним интегральных (ступенчатых) изменений. В этом случае ординаты, пропорциональные частотам интервалов, восстанавливаются перпендикулярно оси абсцисс в точках, соответствующих серединам интервалов (по табл. 1.37). Вершины ординат соединяются ломаной кривой (рис. 1.12).

Гистограмма распределения обычно строится для интервального изменения значения параметра. При этом на интервалах, отложенных по оси абсцисс, строят прямоугольники (столбики), высоты которых пропорциональны частотам интервалов. Гистограмма, построенная по данным табл. 1.37, представлена на рис. 1.13.

Если на гистограмму нанести еще и полигон, то по мере роста числа измерений одновременно будет изменяться ширина класса и полигон будет приближаться к кривой плотности вероятностей, представляющей собой кривую теоретического распределения. На рис. 1.13 такая кривая нанесена штриховой линией.

Кумулятивная кривая (кумулята) представляет собой график накопленных частот (частостей). Эта кривая еще называется интегральной. При построении этой кривой накопленные частоты относятся не к серединам интервалов, а к верхним границам каждого

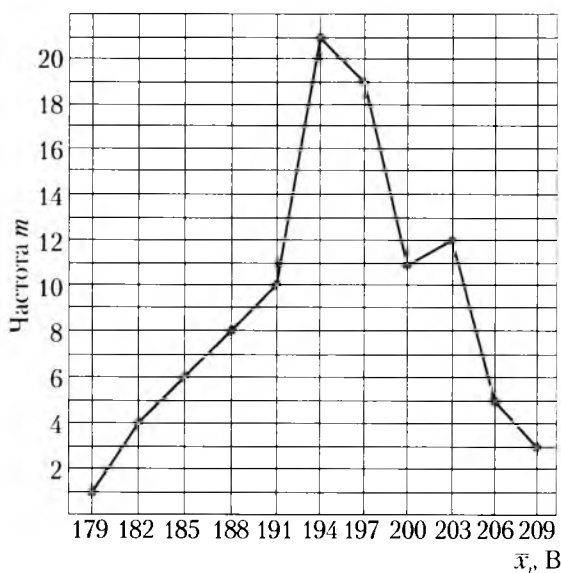


Рис. 1.12. Полигон интервального ряда, представленного в табл. 1.37

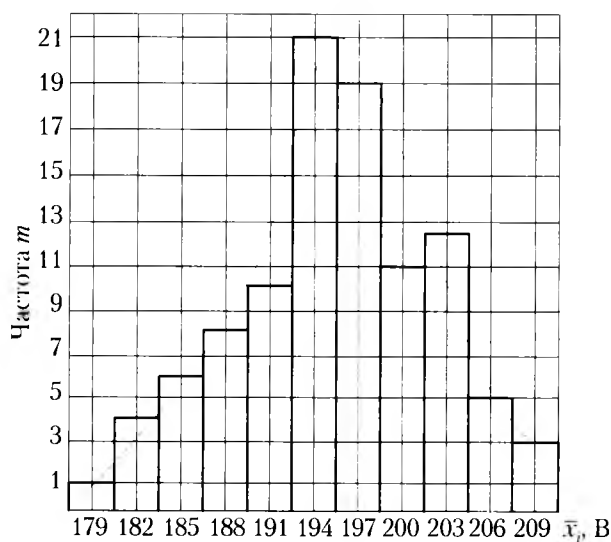


Рис. 1.13. Гистограмма и ориентировочно нанесенная штриховой линией кривая плотности вероятностей

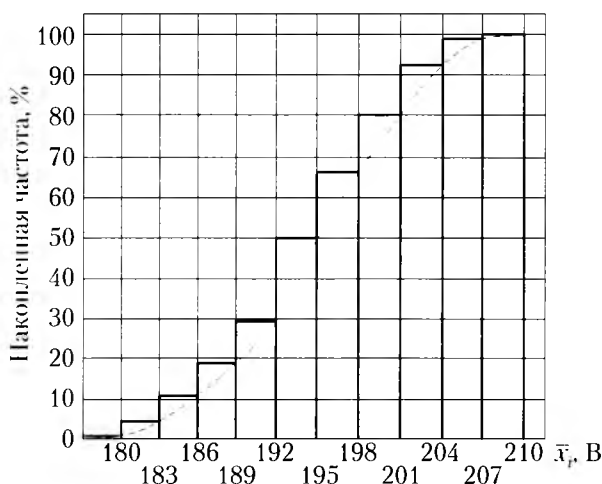


Рис. 1.14. График накопленных частотей (частот) с нанесенной на нем штриховой линией — кумулятой

из них. Высота последней ординаты соответствует объему наблюдений всего ряда или 100 % (рис. 1.14).

Статистические ряды характеризуются и численными показателями:

- средней арифметической величиной

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Например, если по табл. 1.35 из ряда взять пять первых значений: $x_1 = 180$ В, $x_2 = 181$ В, $x_3 = 182$ В, $x_4 = 183$ В и $x_5 = 184$ В ($n = 5$, и $\sum_{i=1}^5 x_i = 910$ В), то для данной выборки $\bar{x} = 910 : 5 = 182$ В;

□ средневзвешенной величиной $\bar{n}_c$, которая имеет место в рядах, когда значениям параметров присуща частота m_c . Для указанной выше выборки из пяти значений параметра

$$\begin{aligned} \bar{n}_c &= \frac{1}{5} (x_1 m_1 + x_2 m_2 + x_3 m_3 + x_4 m_4 + x_5 m_5) = \\ &= \frac{1}{5} (180 \cdot 1 + 181 \cdot 2 + 182 \cdot 1 + 183 \cdot 1 + 184 \cdot 2) = 225 \text{ В}; \end{aligned}$$

□ показателем приблизительной оценки рассеивания значения может быть разность предельных значений x — размах R :

$$R = x_{\max} - x_{\min} = x_{31} - x_1 = 210 - 180 = 30 \text{ В};$$

□ выборочной дисперсией S^2 , показывающей, как тесно группируются отдельные значения вокруг средней арифметической $\bar{x}$ или как они рассеиваются вокруг нее:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}. \quad (1.70)$$

Для рассмотренной выше выборки из пяти первых значений ранжированного ряда (см. табл. 1.35) по формуле (1.70) при $\bar{x} = 182$ без учета частот выборочная дисперсия определяется так:

$$S^2 = \frac{1}{5-1} [(180-182)^2 + (181-182)^2 + (182-182)^2 + (183-182)^2 + (184-182)^2] = \frac{4+1+0+1+4}{4} = 2,5.$$

При наличии частот m_i —

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 m_i}{n_1 - 1}, \quad (1.71)$$

где $n_1 = \sum_{i=1}^k m_i$ ($m_1 = 1$; $m_2 = 2$; $m_3 = 1$; $m_4 = 1$ $m_5 = 2$).

Для той же выборки $n_1 = 1 + 2 + 1 + 1 + 2 = 7$, а дисперсия, определяемая по формуле (1.71),

$$S^2 = \frac{1}{7-1} [(180-182)^2 \cdot 1 + (181-182)^2 \cdot 2 + (182-182)^2 \cdot 1 + (183-182)^2 \cdot 1 + (184-182)^2 \cdot 2] = \frac{(4+2+0+1+8)}{6} = 2,5.$$

Вместо величины S^2 обычно используется стандартное отклонение $S = \sqrt{S^2}$, имеющее ту же размерность, что и $\bar{x}$ (в рассматриваемом примере — вольты).

Математическое ожидание является характеристикой положения случайной величины в генеральной совокупности. По сути это генеральное среднее арифметическое значение случайной величины — центр группирования ее значений в генеральной совокупности. Случайная величина может занимать дискретные положения — для рассматриваемого примера $x_1 = 180$ В; $x_2 = 181$ В; $x_3 = 182$ В; $x_4 = 183$ В и $x_5 = 184$ В с соответствующими вероятностями $P_1 = P_3 = P_4$ и $P_2 = P_5$. В этом случае можно воспользоваться выражением средневзвешенной величины, где каждое значение x_i при усреднении учитывается исходя из ее частоты m_i (повторения), пропорциональной вероятности этого значения. В выборке из пяти измерений вероятность повторения значений x_2 и x_5 с частотой $m = 2$ в два раза больше, чем значения x_1 , x_3 и x_4 , у которых $m = 1$. Из этого можно заключить, что вероятность значений x_1 , x_3 , x_4 : $P_{1,3,4} = 0,143$ (14,3 %), x_2 , x_5 — $P_{2,5} = 0,286$ (28,6 %).

Математическое ожидание Mx (генеральное среднее арифметическое значение величины X) определяется из выражения

$$\begin{aligned} Mx &= \sum x_i P_i = x_1 P_1 + x_2 P_2 + x_3 P_3 + x_4 P_4 + x_5 P_5 = \\ &= 180 \cdot 0,143 + 181 \cdot 0,286 + 182 \cdot 0,143 + 183 \cdot 0,143 + 184 \cdot 0,286 = \\ &= 25,74 + 51,766 + 26,026 + 26,169 + 52,624 = 182,325 \text{ В.} \end{aligned}$$

Дисперсия S_x^2 случайной величины X в генеральной совокупности определяется по формуле:

□ для случая неповторяемости значений x_i

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [Mx - x_i]^2}{n}; \quad (1.72)$$

□ для случая повторяемости значений x_i

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [Mx - x_i]^2 m_i}{n_1}, \quad (1.73)$$

где $n_1 = \sum_{i=1}^k m_i$.

Из примера расчета величины S^2 для выборки из пяти первых значений ряда (табл. 1.35) имеем $n_1 = 7$; из примера расчета математического ожидания $Mx = 182,325$ В.

Без учета частоты повторения значений по формуле (1.72)

$$S_x^2 = \frac{(182,325 - 180)^2 + (182,325 - 181)^2 + (182,325 - 182)^2 + (182,325 - 183)^2 + (182,325 - 184)^2}{5} =$$

$$= \frac{5,406 + 1,756 + 0,106 + 0,456 + 2,806}{5} = 2,106.$$

С учетом повторения значений (частоты) расчет S_x^2 ведется по выражению (1.73):

$$S_x^2 = \frac{(182,325 - 180)^2 \cdot 1 + (182,325 - 181)^2 \cdot 2 + (182,325 - 182)^2 \cdot 1 + (182,325 - 183)^2 \cdot 1 + (182,325 - 184)^2 \cdot 2}{7} =$$

$$= \frac{5,406 + 1,756 \cdot 2 + 0,106 \cdot 1 + 0,456 \cdot 1 + 2,806 \cdot 2}{7} = 2,299.$$

При оценке рассеивания удобнее пользоваться средним квадратическим отклонением (стандартным отклонением, стандартом) $S_x = \sqrt{S_x^2}$.

1.5. Методы и средства измерения в машиностроении и приборостроении



1.5.1. Разновидности измерений и практический расчет их погрешностей

Основой экспериментов являются измерения физических величин. Измерения дают физическую оценку измеряемой величины на основе измерительного преобразования на технических устройствах (измерительном оборудовании, приспособлениях). Принципом

измерения является совокупность физических явлений, на которых основано измерение, а способом измерения — совокупность приемов использования принципов и измерительных средств.

Измерительные преобразовательные средства можно подразделить на три класса: пропорциональные, функциональные и операционные. По характеру измерения входных и выходных сигналов во времени они делятся на программные (аналоговые), непрерывно-дискретные (дискретно-непрерывные), дискретные [21].

По способу получения информации измерения могут быть прямые, косвенные, совокупные и совместные.

По характеру изменения измеряемой величины измерения подразделяются на статистические, динамические и статические.

По количеству измерительной информации различаются однократные, многократные и параллельные исследования.

По отношению к основным единицам измерения делятся на абсолютные и относительные.

По точности измерения подразделяются на равноточные и неравноточные, равно рассеянные и неравно рассеянные [3].

Пример. Определить мощность W постоянного тока косвенным путем при четырехкратном измерении напряжения U и силы тока I . Необходимо квалифицировать выполненные измерения.

Результаты измерений сведены в табл. 1.38.

Таблица 1.38

Средние значения U и I на базе четырехкратного измерения величин

Параметр, средство измерения, единица величины	Номер измерения				Среднее значение параметра
	1	2	3	4	
Напряжение U , вольтметр, вольт (В)	24.85	24.91	25.01	25.08	24.96
Сила тока I , миллиамперметр, миллиампер (мА)	2.75	2.78	2.81	2.90	2.81

Расчет мощности косвенным путем:

$$W = \bar{U} \cdot \bar{I} = 24,96 \cdot 2,81 = 70,14 \text{ мВт.}$$

Сведения о квалификации измерений приведены в табл. 1.39.

Таблица 1.39

Используемые методики измерений

Параметр, средство измерения	Разновидности измерений				
	По видам	Прямые, косвенные	Совокупные, совмещенные	Абсолютные, относительные	Многократные
Напряжение, вольтметр	Электрические	Прямые	—	Абсолютные	Многократные
Сила тока, миллиамперметр	Электрические	Прямые	—	Абсолютные	Многократные
Мощность	Электрические	Косвенные	Совокупные	Абсолютные	С многократными прямыми

Погрешность измерения — это отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Абсолютная погрешность измерения

$$\pm \Delta x = x_{\text{изм}} - x_{\text{д}},$$

где $x_{\text{изм}}$ — измеренное значение физической величины; $x_{\text{д}}$ — действительное значение величины.

В практике различают:

- систематические погрешности;
- погрешности метода измерения;
- погрешности из-за изменения условий измерения (окружающей среды);
- субъективные погрешности (индивидуальные особенности оператора);
- неисключенные систематические погрешности (погрешности вычисления и введения поправок);
- случайные погрешности измерений (перекося губок измерителя, изменение сил их поджима к поверхностям и т.п.);
- абсолютные погрешности измерения, выраженные в единицах измеряемой величины;

□ относительные погрешности α измерения, выраженные дробью или процентами:

$$\alpha = \pm \frac{\Delta x}{x} \quad \text{или} \quad \alpha = \pm \frac{\Delta x}{x} \cdot 100,$$

где Δx — абсолютная погрешность измерения; x — действительное значение величины.

С целью исключения влияния систематической погрешности вводится числовой коэффициент k , на который с учетом доверительной вероятности P умножается неисключенная погрешность. Например $k = 1,4$ при $P = 0,99$.

Случайная погрешность

$$v_i = x_i - \bar{x}.$$

Среднеквадратическое отклонение S_{xm} значений случайной погрешности по результатам выявления

$$S_{xm} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}.$$

При определении погрешности с большой вероятностью (больше, чем $P = 0,68$) вычисляется среднеквадратическое отклонение результата среднеквадратического отклонения случайной погрешности:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n v^2},$$

а затем определяется доверительная граница $\Delta \bar{x}$ случайной погрешности:

$$\Delta \bar{x} = t_{n\alpha} S_{\bar{x}}$$

где $t_{n\alpha}$ — критерий Стьюдента (см. табл. 1.2).

Пример. Требуется определить пределы абсолютной и относительной погрешности измерения напряжения $U_1 = 8,6$ В, если измерение осуществляется магнитоэлектрическим вольтметром с нулем в середине шкалы, классом точности 2,5 (это %) и пределом измерения $U = \pm 25$ В.

Выявляется предел абсолютного значения измеряемого напряжения:

$$U_{\Pi} = |-25| + |25| = 50 \text{ В.}$$

Определяется абсолютная погрешность измеряемого напряжения:

$$\pm \Delta U = \frac{2,5 \cdot 50}{100} = 1,25 \text{ В.}$$

Определяется относительная погрешность α' измерения заданного значения напряжения:

$$\alpha' = \pm \frac{\Delta U \cdot 100}{U_1} = \frac{1,25 \cdot 100}{8,6} \approx 14,5 \text{ \%}.$$

Пример. В электрической сети был осуществлен ряд прямых измерений (всего 10) сопротивления, кОм: 32,700; 32,774; 32,786; 32,848; 32,578; 32,593; 32,588; 32,519; 32,603; 32,627.

Необходимо обработать ряд результатов наблюдений и оценить случайную погрешность, предположительно считая результаты правильными и равноточными (находящимися в пределах допуска) при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Ряд можно считать очищенным, так как в условии указано, что результаты считаются правильными, равноточными и нет необходимости исключать отдельные погрешности, являющиеся «всплесками».

Определяется среднеарифметическое значение сопротивления ($n = 10$):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{32,700 + 32,774 + 32,786 + 32,848 + 32,578 + 32,593 + 32,588 + 32,519 + 32,603 + 32,627}{10} = 32,659 \text{ кОм.}$$

Определяются случайные отклонения по результатам отдельных наблюдений (табл. 1.40):

$$v_i = x_i - \bar{x}.$$

Таблица 1.40

Результаты расчета

Величина	Номер измерения				
	1	2	3	4	5
$ v_i $	0,012	0,086	0,098	0,160	0,110
v_i^2	0,000144	0,007396	0,009604	0,0256	0,0121

Продолжение табл. 1.40

Величина	Номер измерения				
	6	7	8	9	10
$ v_i $	0.095	0.100	0.169	0.085	0.061
v_i^2	0.009025	0.0100	0.028561	0.007225	0.003721

$$\sum v_i^2 = 0.113376.$$

Определяется среднее квадратическое отклонение по данным табл. 1.40:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} = \sqrt{\frac{1}{10-1} 0.113376} = 0.1122376 \approx 0.112 \text{ кОм.}$$

С помощью критерия «трех сигм» проверяется наличие грубых погрешностей значений (всплесков). Если $|v_i| > 3S_y$, то такие значения следует исключить из рассмотрения и повторить вычисления по всем предыдущим пунктам без учета исключенных значений. В рассматриваемом случае

$$3S_y = 3 \cdot 0.112 = 0.336 \text{ кОм.}$$

Ни одно из значений $|v_i|$ (см. табл. 1.40) не превышает этого порога, т.е. $3S_y > |v_i|$. Значит, «всплески» значений v_i отсутствуют.

Определяется среднее квадратическое отклонение S_y результата среднего квадратического измерения S_y :

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n v_i^2} = \frac{S_y}{\sqrt{n}} = \frac{0.112}{\sqrt{10}} \approx 0.0354 \text{ кОм.}$$

Выдвигается и проверяется гипотеза о принадлежности результатов измерений нормальному распределению. При числе результатов измерений $n \leq 15$ принадлежность их к этому распределению не проверяется, что соответствует рассматриваемому случаю — $10 < 15$.

Определяются доверительные границы случайной погрешности результата измерения:

$$\Delta y = t_{n\alpha} S_y,$$

где $t_{n\alpha}$ — критерий Стьюдента.

По табл. 1.2 при количестве измерений $n = 10$ и доверительной вероятности $P = 0.95$: $t_{n\alpha} = 2.23$; $S_y = 0.0354$ кОм. Тогда

$$\Delta y = 2.23 \cdot 0.0354 = 0.078942 \approx 0.1 \text{ кОм.}$$

По полученным показателям при систематической доверительной погрешности результаты измерений можно представить в виде

$$x = \bar{x} \pm \Delta x = 32.688 \pm 0.1 \text{ кОм.}$$

1.5.2. Измерение линейных и угловых величин

Для измерения длин, диаметров и углов применяются ручные шкальные устройства, пневматические, индуктивные, механотронные, оптико-механические, оптические и акустические измерительные приборы [21].

Шкальные средства для ручного измерения предназначены для измерения методом сравнения со штриховой мерой (шкалой) или эталоном.

Первый принцип реализован в штангенинструментах, микрометрах и угломерах типа УМ и УН. Для повышения точности отсчета в указанных устройствах используются нониусы. Обычно допускаемая погрешность измерения штангенинструментов ± 0.05 мм, микрометров $\pm 0.01 \dots \pm 0.004$ мм, угломеров $\pm 2' \dots \pm 5'$.

Второй принцип реализуется в рычажно-механических приборах (индикаторах часового типа, измерительных головках с рычажно-зубчатой передачей, пружинных головках). Эти приборы показывают на стрелочных шкалах отклонения измеряемого размера от известного размера эталона. Для повышения точности в них используются механические измерительные преобразователи. Технические характеристики индикаторов и измерительных головок приведены в справочниках по производственному контролю в машиностроении. Погрешность указанных средств измерения находится в пределах от 0,01 до 0,0001 мм.

Пневматические измерительные приборы применяются для линейных измерений методом сравнения с эталоном. Они обеспечивают высокую точность и относительно небольшие затраты времени на измерения и позволяют осуществлять их бесконтактным и контактными методами.

На рис. 1.15 показана блок-схема пневматического эжекторного прибора для бесконтактного измерения отклонения размера измеряемого изделия Z от эталона (обычно блока концевых мер). Сжатый воздух под постоянным избыточным давлением истекает

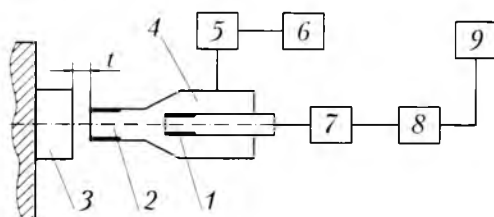


Рис. 1.15. Блок-схема эжекторного пневмонприбора для измерения линейных размеров

из входного сопла 1 непосредственно в измерительное сопло 2 и далее через кольцевой зазор в атмосферу. Постоянство давления и незагрязненность сжатого воздуха, подаваемого из источника 9, обеспечиваются стабилизатором давления 7 и фильтром очистки 8. Давление в измерительной камере 4 зависит от величины зазора. Эта зависимость имеет значительный линейный участок (для сопла диаметром 1,75 мм при l от 0,190 до 0,600 мм). Давление при помощи измерительной схемы 5 преобразуется в сигнал, удобный для регистрации индикатором 6.

Наиболее совершенной является дифференциальная измерительная схема, в которой измерителем (жидкостным, сильфонным или мембранным манометром) определяется разность давлений в двух ветвях системы — рабочей и калибровочной (с регулируемым зазором).

Схема дифференциального пневматического эжекторного прибора для контактного измерения отклонения размера объекта показана на рис. 1.16. При изменении размера объекта 1 перемещением штока 2 с конической заслонкой изменяется значение кольцевого зазора в сопле рабочего пневматического преобразователя 3 и в его измерительной камере устанавливается давление P_1 , отличающееся от давления P_2 в измерительной камере калибровочного пневматического преобразователя 6. Разность давлений $P_1 - P_2$ измеряется и преобразуется индикатором 5 в удобный для регистрации сигнал. Работа прибора обеспечивается стабилизированным источником сжатого воздуха 4. Для настройки на размер по эталону служит регулировочный винт 7. Цена деления шкалы пневматических длинномеров низкого давления составляет от 0,5 до 5 мкм. Разработаны пневматические приборы низкого и высокого давления с наимень-

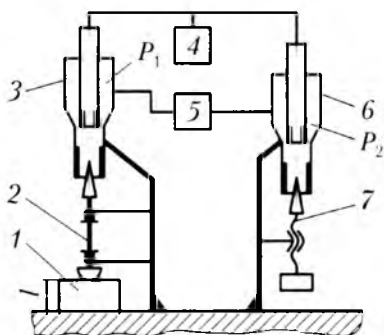


Рис. 1.16. Схема дифференциального эжекторного пневмоприбора для линейных измерений

шей ценой деления 0,1 мкм и широким диапазоном измерений. Пневматические приборы позволяют осуществлять дистанционный контроль, а в сочетании с механоэлектрическими измерительными преобразователями автоматизировать процесс регистрации результатов измерения.

Индуктивные приборы отличаются высокой точностью, пригодны для ведения дистанционных измерений, легко сочетаются с ЭВМ, что позволяет при необходимости автоматизировать процесс обработки результатов измерений.

В индуктивных преобразователях используется свойство катушки индуктивности изменять свое реактивное сопротивление при изменении некоторых ее параметров. Для этого один из элементов магнитной цепи (якорь) выполняется подвижным, и от его положения относительно неподвижной части зависит магнитное сопротивление цепи, а следовательно, и индуктивное сопротивление катушки. Перемещение якоря связывается с измеряемой линейной или угловой величиной, при этом изменяется или воздушный зазор, или площадь сечения воздушного зазора плоскостью, перпендикулярной к вектору магнитной индукции.

Для повышения чувствительности индуктивные преобразователи выполняются дифференциальными с подключением обеих катушек в измерительную (например, мостовую) схему. На рис. 1.17 показана схема индуктивного прибора с дифференциальным преобразователем. При воздействии объекта измерений 1 на шток 2 изменяются зазоры δ_1 и δ_2 между якорем 3 и магнитопроводами с катушками 4 и 5, которые подключены к мостовой измерительной схеме 6. Сигнал рассогласования через усилитель 7 подается

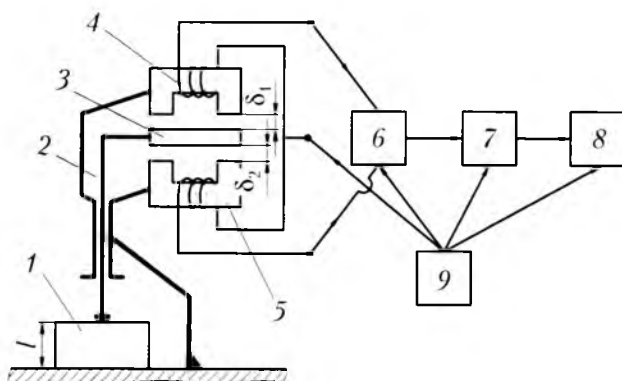


Рис. 1.17. Схема прибора индуктивного действия с дифференциальным преобразователем

на индикатор (показывающее или записывающее устройство) 8. Для работы прибора необходим источник питания 9.

Индуктивные преобразователи с переменным зазором имеют нелинейную характеристику, поэтому диапазон измерения приборами с таким преобразователем невысок (0,1...0,3 мм). Индуктивные преобразователи с переменной площадью зазора имеют линейную характеристику, но относительно невысокую чувствительность. Их можно использовать для измерения больших отклонений линейных или угловых величин. Предпочтительно использование аналого-цифровых преобразователей в индикаторах.

Для измерения линейных или угловых величин со значительным диапазоном отклонений применяют индуктивные приборы с дифференциальным преобразователем соленоидного типа (рис. 1.18, а). Соленоидный преобразователь состоит из двух катушек 4 и 2, внутри которых помещен ферромагнитный сердечник (якорь) 3. При перемещении якоря вдоль оси катушек индуктивность последних изменяется. Характеристика соленоидного преобразователя линейна, а измерительные усилия незначительны. В существующих приборах с усилителями эти преобразователи позволяют получить цену деления от 0,05 до 1 мкм и пределы измерения от очень малых (± 3 мкм) до относительно больших, ($\pm 1,5$ мм).

В индуктивных трансформаторных преобразователях (рис. 1.18, б) используется зависимость индуктивной связи между

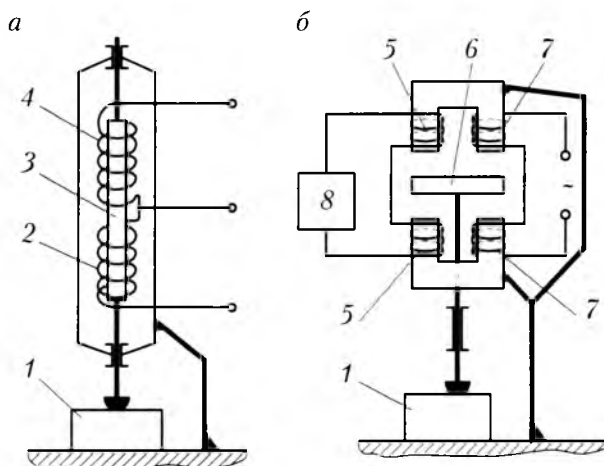


Рис. 1.18. Дифференциальные индуктивные преобразователи типов:
а — соленоидного; *б* — трансформаторного

катушками 5 и 7 от положения якоря 6. При симметричном расположении якоря ток в измерителе 8 равен нулю, так как первичные катушки 7 (и, аналогично, вторичные 5) одинаковы и включены последовательно. При перемещении якоря под действием объекта измерения 1 из среднего положения магнитные сопротивления, а следовательно, и магнитные потоки, пронизывающие вторичные катушки, будут неодинаковыми и в измерителе появится сигнал, пропорциональный разности индуцированных во вторичных катушках электродвижущей силы — ЭДС.

Механотрон (рис. 1.19) является измерительным преобразователем высокой чувствительности. Он представляет собой диод с подогреваемым катодом, причем расстояние δ между катодом К и анодом А изменяется вследствие изменений измеряемого размера объекта 3 на величину $\delta_{\text{из}}$. Перемещение аноду передается рычагом 2, закрепленным на мембране 1. Для повышения чувствительности применяют, как правило, двойные диоды. В этом случае уменьшается влияние колебаний питающего напряжения и температуры. Такие механотроны, включенные в мостовую измерительную схему, при относительно небольших габаритах (30×80 мм) имеют диапазон измерений $\pm 0,1$ мм, измерительное усилие ± 100 мН и вариации показаний в пределах $\pm 0,04$ мкм [21].

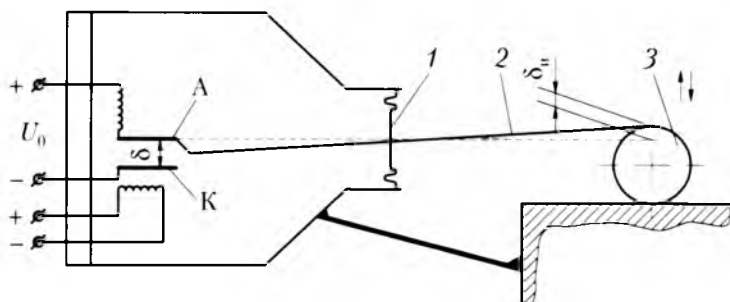


Рис. 1.19. Схема устройства механотрона

Оптико-механические и оптические приборы также используются для контроля линейных и угловых величин. В их состав входят оптиметры, оптические длиномеры, измерительные микроскопы, катетометры, делительные головки и столы, интерферометры.

Оптиметры работают по принципу оптического рычага. При перемещении измерительного наконечника изображение шкалы с ценой деления 1 мкм, наблюдаемое в окуляр, смещается относительно неподвижного индекса. В оптических длиномерах для повышения точности отсчета применяется окулярный спиральный микрометр.

Измерительные микроскопы предназначены для измерения в прямоугольных и полярных координатах линейных и угловых размеров резьбовых изделий, режущего инструмента, профильных шаблонов и других изделий, а также расстояний между осями отверстий и т.п. В большинстве микроскопов используется проекционный метод измерения (в проходящем и отраженном свете), метод осевого сечения (с помощью измерительных ножей) или контактный способ. Измеряемая деталь может базироваться в центрах или на стекле стола. Цена деления шкал микроскопов: отсчетной системы измерения длины — от 0,005 до 0,001 мм, угломерной головки — 1', нониуса круглого стола — от 30'' до 5' [21].

Катетометры применяются для измерения линейных размеров изделий, недоступных для непосредственного измерения. Визирная труба последовательно наводится на начало и конец измеряемого отрезка. Перемещение трубы, определяемое на шкале с помощью нониуса или микроскопа, равно длине измеряемого отрезка.

Для измерения центральных углов и длины в полярных координатах применяются оптические **делительные головки**. Цена деления от $2''$ до $1'$. Измеряемые объекты крепятся в шпинделе головки или в центрах. Для тех же целей, что и делительные головки, применяют оптические **делительные столы**. Цена деления отсчетной шкалы у делительных столов от $20''$ до $1'$. Роль фиксатора при измерениях углов выполняют индикаторы часового типа, измерительные головки или автоколлиматоры.

Из всех источников излучения оптического диапазона газовые лазеры характеризуются наибольшей степенью когерентности (связи, согласования) и монохроматичности (одной определенной частоты) генерируемого ими излучения. Кроме того, газовые лазеры могут длительное время работать при комнатной температуре без специальных устройств охлаждения, малочувствительны к изменению температуры окружающей среды, а излучаемый ими луч имеет малый угол расходимости (от $20''$ до $3'$).

Лазерный интерферометр, предназначенный для измерения длины и линейных перемещений, показан на рис. 1.20. Излучение одночастотного лазера 8 через коллиматор 9 идет на светоделительный кубик 10, который направляет часть излучения на подвижное зеркало, связанное с объектом измерения 1, а другую часть — на неподвижное зеркало 11. Отраженные от этих зеркал составляющие излучения интерферируют на разделительной плоскости кубика 2 и через регулируемые щелевые диафрагмы 7 и 3 направляются на фотоприемники 4 и 6. Задачей фотоприемников является преобразование колебаний интенсивности освещенности, воспринимаемых в виде интерференционных полос, в соответствующее изменение электрического сигнала на их выходе, которое фиксируется отсчетным устройством 5. Отсчетное устройство обеспечивает усиление и формирование электрических сигналов обоих каналов, сдвинутых по фазе на $\pi/2$, их аналого-дискретное преобразование на фоточувствительной логической схеме и выдачу на реверсивный счетчик сигналов на вычитание или сложение в зависимости от соотношения фаз обоих каналов.

Оптическая схема интерферометра обеспечивает цикл изменения освещенности фотоприемника при изменении оптической длины плеча на половину длины волны излучения. Для измерения относительно больших перемещений применяют интерферометры

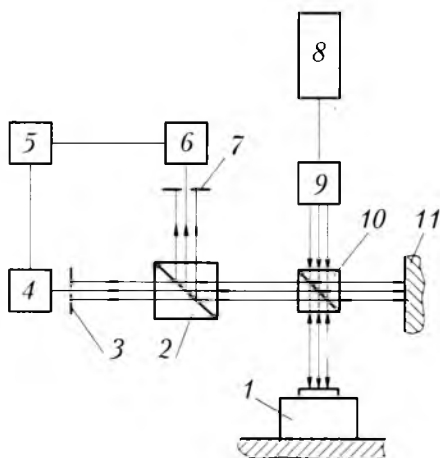


Рис. 1.20. Схема действия лазерного интерферометра

с угловыми отражателями. При этом обеспечивается параллельность падающего и отраженного лучей света и стабилизируется пространственный сдвиг фаз. Наклон угловых отражательных призм до 4° не вносит существенных ошибок в результаты измерений. Дрейф характеристик фотоприемников, нулей постоянного тока и порогов срабатывания формирующих устройств, а также изменение уровня мощности излучения обуславливают снижение надежности и стабильности одночастотных интерферометров. Двухчастотные лазерные интерферометры, в отличие от одночастотных, после включения обладают практически мгновенной готовностью к работе. Для них не требуется усиления выходного сигнала фотоприемника усилителем постоянного тока, так как постоянная составляющая выходного сигнала фотоприемника не влияет на работу прибора.

Оптико-электронное измерительное устройство может быть бесконтактным лишь в том случае, если поверхность измеряемой детали включена в оптическую систему как один из его элементов. В таком случае исключается или ограничивается возможность применения интерференционных методов, поскольку шероховатость поверхности детали обуславливает значительное искажение интерференционного поля и во многих случаях невозможность его образования. Этих недостатков не имеет устройство, где используется

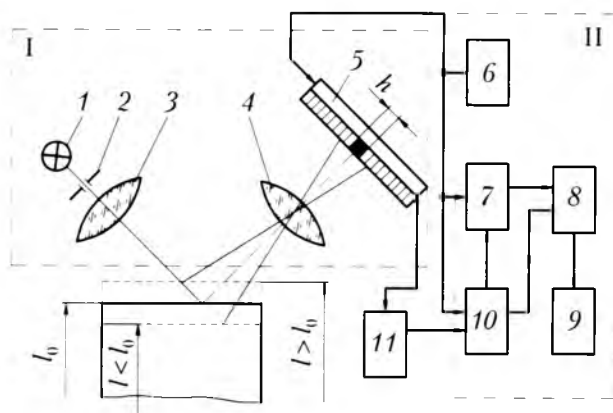


Рис. 1.21. Устройство оптико-электронного действия для замера линейных величин

геометрическое кодирование измерительной информации (рис. 1.21). Конструктивно оно выполнено в виде двух отдельных блоков: оптико-электронного преобразователя I и цифрового блока II. В оптико-электронном преобразователе использован линейный формирователь видеосигналов (ЛФВС) типа А-1034.

Устройство работает следующим образом. Осветитель 1 с помощью щелевой диафрагмы 2 и проецирующего объектива 3 создает на поверхности измеряемой детали световой штрих. Изображение этого штриха через приемный объектив 4 попадает на светочувствительную поверхность ЛФВС 5, в котором происходит преобразование светового потока в электрический сигнал.

При измерении размера детали, большего или меньшего номинального l_0 , световой штрих будет отклоняться в ту или другую сторону от нулевого положения, засвечивая светочувствительные элементы с меньшими или большими порядковыми номерами. В блоке 10 происходит определение положения середины светового штриха на ЛФВС. Блок усреднения 7 позволяет получать средние значения размера по результатам нескольких измерений (до десяти). В блоке 8 вычисляется фактический размер детали, который затем в цифровой форме индицируется в блоке индикации 9. Работой прибора управляет тактовый блок управления 6, который обеспечивает наложение электрических зарядов на свето-

чувствительных элементах в зависимости от энергии падающего на них светового потока и их отвод на приемный блок 11.

Если высота R_z микронеровностей поверхности детали составляет от 40 до 0,1 мкм, то прибор обеспечивает линейную зависимость между сигналами на входе и выходе в пределах 4 мм, погрешность измерения 0,01 мм и время измерения не более 0,1 с [21].

Акустические приборы применяются в основном для измерения толщин, когда нет доступа к одной из противоположных поверхностей изделия. В акустических приборах используются колебания ультразвукового диапазона и относительно небольшой интенсивности (меньше 1 кВт/см²).

Из известных методов акустического контроля для измерений толщин применяют эхо-метод и реже резонансный метод. При первом методе измеряется время прохождения ультразвукового импульса через слой, толщину которого измеряют, или амплитуда и фаза отраженных колебаний. При втором методе измерение толщины основано на явлении резонанса в контролируемом изделии или на других интерференционных явлениях при прохождении акустических волн.

Эхо-импульсные толщиномеры применяются для измерения изделий с тщательно обработанными параллельными поверхностями (группа А) и грубо обработанными непараллельными поверхностями (группа Б). Минимальная толщина плоских изделий (или стенок), измеряемая приборами группы А, составляет 0,2...0,3 мм при абсолютной погрешности измерения не более 10 мкм. Толщина измеряемых стенок труб должна быть не менее 1 мм. Минимальная толщина, измеряемая приборами группы Б, составляет 1,2...1,5 мм при абсолютной погрешности измерения 0,1...0,2 мм. Максимальная измеряемая толщина 20...100 мм.

Блок-схема эхо-импульсного толщиномера показана на рис. 1.22, а. Импульс ультразвукового излучения генератора зондирующих импульсов, пройдя от искателя 1 путь l , отражается противоположной стороной стенки изделия 11 и возвращается в искатель, откуда передается в приемник 2. Усилитель 3 передает отраженный сигнал в усилительный триггер 4, длительность импульса которого равна времени прохождения ультразвуковых волн в изделии. Для этого в триггер 4 поступает также сигнал от генератора развертки 7. Блок временной регулировки чувствительности 8

предназначен для уменьшения чувствительности приемника 2 в момент излучения зондирующего импульса и для восстановления ее. Блоки 7, 10 и 8 управляются синхронизатором 9. Он обеспечивает одновременный (или с задержкой на некоторое определенное время) запуск генераторов зондирующего импульса 10 и развертки 7. При измерении малых толщин длительность выходного импульса измерительного триггера слишком мала. Поэтому для повышения точности измерения используют блок умножения интервала 5. В блоке индикации 6 применяют стрелочные или цифровые индикаторы длительности импульса измерительного триггера, использующие преобразователь время — напряжение. Искатель 1 преобразовывает электромагнитные колебания в ультразвуковые, излучает ультразвуковые волны в изделие, принимает отраженные волны и преобразовывает их в электромагнитные.

Схема совмещенного пьезоэлектрического искателя приведена на рис. 1.22, б. Пьезопластина 16 приклеена или прижата к демпферу 15. Между пьезопластиной и изделием 11, в которое производится излучение, может располагаться несколько тонких промежуточных слоев — один или несколько протекторов 12 и прослойка смазочного материала 17. Искатель размещен в корпусе 14. Выводы 13 соединяют пьезопластину с генератором 10 и приемником 2.

Пьезопластина обычно имеет толщину, равную половине длины ультразвуковой волны в пьезоматериале. На противоположных поверхностях пластины располагаются металлические электроды для подвода переменных электрических зарядов. Демпфер служит для гашения свободных колебаний пьезопластины, т.е. для получения коротких импульсов, а также для предупреждения механических повреждений пластин.

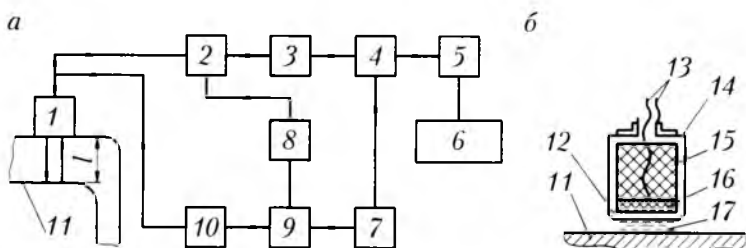


Рис. 1.22. Толщиномер эхо-импульсного действия:
а — блок-схема прибора; б — схема пьезоэлектрического искателя

Протектор представляет собой пластинку толщиной 0,1...0,5 мм из кварца, сапфира или смолы с наполнителем, приклеенную к пьезоэлементу. Он служит для улучшения акустического контакта с изделием и защиты пьезоэлемента от абразивного изнашивания. Корпус обеспечивает экранировку пьезоэлемента и выводов от магнитных полей.

1.5.3. Средства измерения отклонений формы, волнистости и микрогеометрии технических поверхностей

Измерение отклонений от прямолинейности и плоскостности осуществляется с помощью поверочных линеек и плит, механических, индуктивных и оптических приборов.

Для проверки плоскостности «на краску» используют поверочные линейки и плиты. При этом линейку или плиту, покрытую тонким слоем краски (смесь берлинской лазури или турунбулевой сини с машинным маслом), перемешают по проверяемой поверхности. Отклонение от плоскостности по степени точности определяют по числу пятен краски в квадрате со стороной 25 мм, оставшихся на выступах проверяемой поверхности (погрешность проверки 3...5 мкм):

- свыше 20 до 30 — 3...4;
- свыше 12 до 20 — 5...6;
- свыше 5 до 12 — 7...8;
- до 5 — 9...10.

К механическим приборам для измерения неплоскостности можно отнести карусельные и накладные плоскомеры, эталонные линейки, автоколлиматоры, оптические линейки.

Карусельный плоскомер (рис. 1.23) состоит из стойки 3, вокруг которой поворачивается кронштейн 2 с измерительной головкой 1. При помощи винтов 4 прибор устанавливается так, чтобы показания измерительной головки были одинаковы в трех точках проверяемой поверхности, не лежащих на одной прямой. По этим точкам измерительная головка устанавливается на нуль, затем определяются отклонения в других точках поверхности.

Накладной плоскомер (рис. 1.24) имеет двухступенчатые само-останавливающиеся опоры 3, каждая из которых опирается на два качающихся балансира 2. Перемещая плоскомер по проверяемой

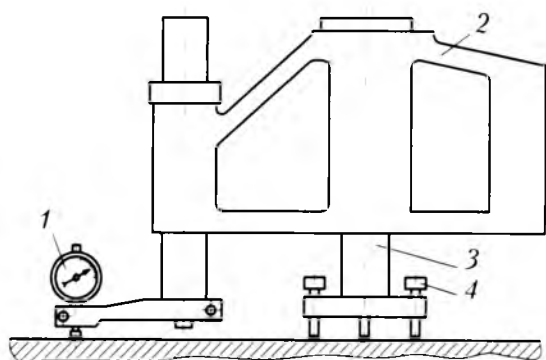


Рис. 1.23. Схема плоскомера карусельного типа

плоскости 1 и замеряя отклонения в равностоящих точках при помощи измерительной головки 5, установленной в штанге 4, можно получить 25–50 результатов измерений для их гармонического анализа на ЭВМ, который позволит описать профиль поверхности рядом Фурье, начиная со второй гармоники до любой N -й [21].

Схема измерения непрямолинейности и неплоскостности при помощи *эталонной линейки* и двух индуктивных преобразователей показана на рис. 1.25. Линейка 2 устанавливается на двух опорах 1. Индуктивные преобразователи 5 крепятся к каретке 7, которую перемещают по контролируемой поверхности, и подключаются к измерительной схеме 4. Определяется полусумма или разность измеренных отклонений. Результаты записываются самописцем 3. Устройство работает от источника питания 6. Для измерения непрямолинейности применяют также линейки с одним индуктивным преобразователем.

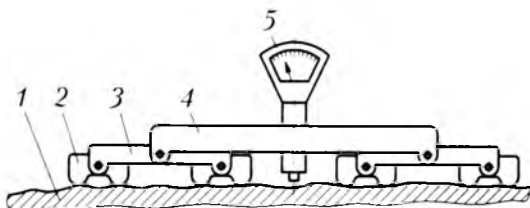


Рис. 1.24. Плоскомер накладного типа

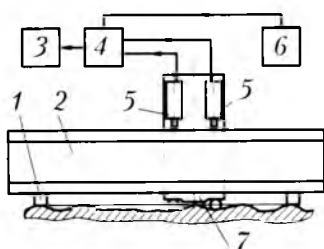


Рис. 1.25. Измерение отклонения от прямолинейности посредством эталонной линейки

Схема способа измерения непрямолинейности при помощи **автоколлиматора** приведена на рис. 1.26. Автоколлиматор 6 устанавливается рядом с проверяемой поверхностью детали 1 на подставке 8 и выверяется при помощи винтов 7 так, чтобы его ось была перпендикулярна к плоскости зеркала 3 и находилась на одной высоте с центром этого зеркала. Выверка производится при двух крайних положениях каретки 2. При этом разница в отсчетах не должна превышать $20''$. Для контроля каретка с зеркалом последовательно перемещается из одного крайнего положения в другое с шагом, равным h . Вследствие непрямолинейности поверхности наклон зеркала изменяется при каждом перемещении и отраженный луч смещается. Это смещение можно измерять при помощи окуляр-микрометра автоколлиматора или фотоэлектрического преобразователя. Полученный сигнал усиливается в измерительной схеме 5 и в аналоговой или цифровой форме выдается индикатором 4.

Для измерения неплоскостности и непрямолинейности применяют также **оптические линейки**, принцип действия которых аналогичен описанному для прибора, показанного на рис. 1.25. Но в данном случае роль линейки играет луч света, и щуп с освещаемой маркой касается измеряемой поверхности. Отклонения

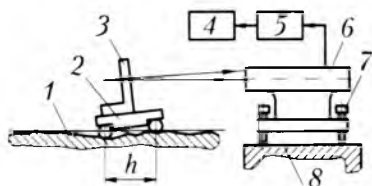


Рис. 1.26. Измерение отклонения от прямолинейности с помощью автоколлиматора

изображения марки измеряют при помощи окуляр-микрометра или другого автоматически действующего преобразователя.

Непрямолинейность и неплоскостность небольших поверхностей высокой точности может проверяться также с помощью интерферометров.

Отклонение от круглости измеряется на **кругломерах**, в которых используется принцип образцового вращения. Может вращаться как измерительный наконечник, так и измеряемая деталь. Биение шпинделей этих приборов не превышает 0,05...0,07 мкм. На рис. 1.27 показана схема прибора первого типа. Измеряемая деталь 1 закрепляется на призме 4 прихватом 2. При помощи крестового стола 3 ось детали совмещается с осью шпинделя 7, на котором закреплены направляющие 8 индукционного преобразователя 6. При вращении шпинделя деталь ошупывается по окружности наконечником 5. Увеличенные в 10^3 – 10^4 раз перемещения наконечника записываются в полярной системе координат на бумажном диске (круглограмме). Круглограмма позволяет определять отклонения формы детали от прилегающей окружности. На кругломерах можно также измерять непрямолинейность наружных или внутренних образующих цилиндрических деталей и неплоскостность торцов. Для этого используется прямолинейное движение бабки со шпинделем по направляющим 9.

Отклонение от круглости можно также измерять с помощью **измерительных головок** при установке проверяемой детали в центрах делительной головки или в призме (рис. 1.28, а). Однако

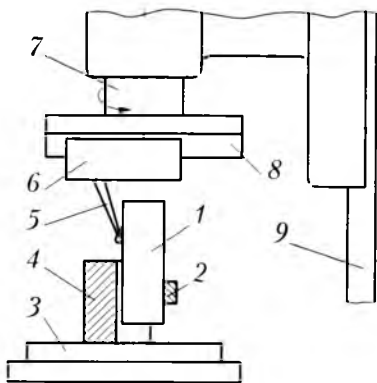


Рис. 1.27. Измерение отклонения от круглости методом образцового вращения

при установке и вращении измеряемой детали в призме показания измерительной головки зависят не только от отклонения от круглости, но и от соотношения числа выступов и впадин на детали и угла призмы. Чтобы уменьшить возникающую при этом погрешность измерения, рекомендуется применять самоустанавливающиеся многозвенные призмы (рис. 1.28, б). Отношения показаний (b) по шкале измерительной головки к двойной амплитуде (a) отклонения при угле призмы 90° в зависимости от номера гармоники n (если некруглую поверхность аппроксимировать рядом Фурье) приведены в табл. 1.41.

Таблица 1.41

Показания по шкале измерительной головки при угле призмы 90° [21]

n	2	3	4	5	6	7	8	9
b/a	1	2,06	0,04	2,08	1	0,06	2,41	0,06

Микрогеометрия поверхностей подразделяется на шероховатость с хаотичными по форме и расположению микронеровностями и на регулярные микрорельефы (РМР), характеризующиеся упорядоченными по форме и расположению микронеровностями. Шероховатость поверхности нормируется ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики». РМР предусмотрены ГОСТ 24773–81 «Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики».

Методы измерения параметров микрогеометрии поверхности можно разделить на контактные и бесконтактные. Приборы, реализующие контактные методы (щуповые): профилометры, непосред-

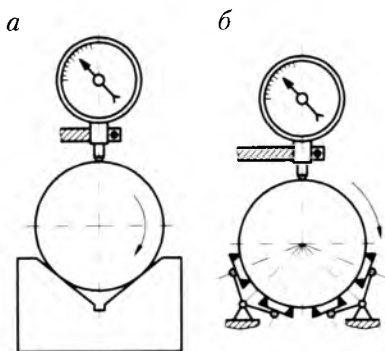


Рис. 1.28. Схемы измерения отклонения от круглости:
а — в призме; б — в самоустанавливающейся многозвенной призме

ственно показывающие среднее арифметическое отклонение профиля поверхности Ra , профилографы, записывающие профиль поверхности и совмещенные профилографы-профилометры.

Блок-схема прибора, использующего *щуповой метод*, показана на рис. 1.29. В процессе измерения поверхность детали 1 ощупывается алмазной иглой 3, закрепленной на рычаге 4, колебания которого при помощи индуктивного или механотронного преобразователя 5 превращаются в электрические. В измерительной схеме 7 эти сигналы усиливаются, интегрируются по перемещению и передаются на индикатор 8, градуированный в значениях Ra или (без интегрирования) на записывающее устройство 9. Необходимое для измерения перемещение ленты сообщается протяжным механизмом 6. При этом корпус преобразователя, шарнирно связанный с узлом 6, опирается на поверхность детали дополнительной опорой 2, ширина которой достаточна, чтобы не реагировать на микронеровности поверхности детали.

Радиус ощупывающей иглы — от 2 до 12 мкм. Скользя по поверхности, она изнашивается и тупится. Кроме того, при сканировании возможны отскоки иглы и пластические деформации микронеровностей. Все это приводит к большим погрешностям при измерениях (в среднем $\pm 10\%$). Чем меньше значение Ra , тем менее достоверна информация о реальном профиле, получаемая с помощью щупового прибора.

Наибольшее распространение из бесконтактных методов получили методы светового сечения, теневой проекции и интерференционные методы. Принципиальная схема *метода светового сечения* показана на рис. 1.30, а. Через осветительную диафрагму 3 контролируемая поверхность детали 1 освещается узкой полоской

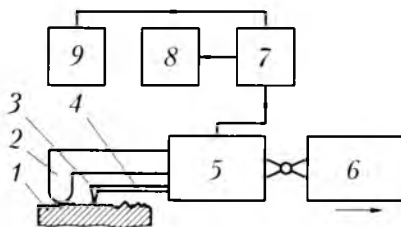


Рис. 1.29. Схема щупового метода измерения параметров микрогеометрии поверхности

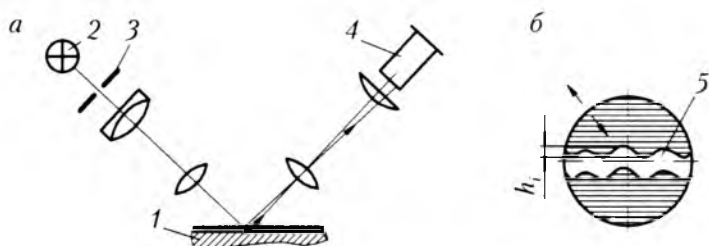


Рис. 1.30. Схема измерения параметров микрогеометрии методом светового сечения

света от источника 2. В поле зрения микрометра 4 видна картина, показанная на рис. 1.30, б. Высота микронеровностей измеряется от визирной линии 5 микрометром 4. Разность отсчетов при совмещении этой линии с верхним и нижним краями неровности считывается с микрометрического барабанчика и позволяет определять значения h_i , необходимые для расчета величины Ra и высоты неровностей по десяти точкам Rz , а также наибольшей высоты профиля $Rmax$.

Метод теневой проекции отличается от описанного тем, что граница между светом и тенью создается острием ножа.

При *интерференционном методе* измерения параметров микрогеометрии поверхность рассматривается в микроскоп. На изображении поверхности возникают интерференционные полосы, по искривлению которых судят о шероховатости. Метод предназначен для оценки параметров шероховатости чисто обработанных поверхностей с диапазоном изменения величины Ra от 0,02 до 0,16 мкм.

Основной недостаток оптических приборов — относительно большая трудоемкость измерения. Этого недостатка лишены методы измерения параметров микрогеометрии при помощи лазера. Наиболее точным и удобным из лазерных методов измерения является метод сдвига частоты излучения.

Блок-схема лазерного профилографа с устройством сдвига частоты излучения, работа которого основана на изменении оптической длины измерительного плеча интерферометра с постоянной скоростью, показана на рис. 1.31. Выходное излучение лазера 5 после прохождения телескопической системы 4 направляется на сканирующее устройство, перемещающее сфокусированное излучение

лазера вдоль измеряемой поверхности, постоянной скоростью v_0 . Сканирующее устройство состоит из кубика 3 с отражающей поверхностью и микрообъектива 2, позволяющего сфокусировать на измеряемой поверхности детали 1 лазерный пучок до 6...8 мкм. Отраженное от поверхности излучение приобретает доплеровский сдвиг частоты, пропорциональный вертикальной составляющей относительной скорости движения поверхности, которая определяется углом подъема освещенного элемента микропрофиля. После вторичного прохождения через сканирующее устройство и резонатор лазера отраженное излучение принимается фотоприемником 6. С выхода фотоприемника электрический сигнал после прохождения через амплитудный ограничитель 7 и узкополосный усилитель 8 поступает на частотный детектор 9. Выходной сигнал частотного детектора подается на интегрирующий усилитель 10, формирующий напряжение, пропорциональное мгновенному значению высот микронеровностей поверхности [21].

В лазерных профилографах применяют также метод В.П. Захарова и Ю.А. Снежко двухканальной фазометрической системы (рис. 1.32). Излучение лазера расщепляется на две части (1 и 2), которые фокусируются объективом 3 на исследуемую поверхность 4. Отраженные составляющие излучения снова собираются объективом и после фотоэлектронной обработки преобразуются в сигнал, пропорциональный разности длин оптических путей первого и второго луча. При движении исследуемой поверхности по координате x (или лучей относительно поверхности) и при постоянном расстоянии x_0 получаемый сигнал пропорционален скорости приращения координаты y . После интегрирования данного сигнала на выходе образуются сигналы, пропорциональные координате y профиля поверхности.

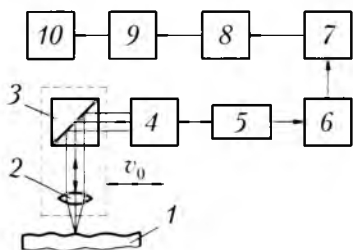


Рис. 1.31. Лазерное профилографирование и блок-схема лазерного профилографа

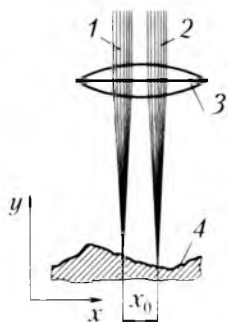


Рис. 1.32. Схема измерения неровностей поверхности посредством двухканальной фазометрической системы

За последнее время создан ряд новых способов и средств оценки параметров микрогеометрии поверхности на уровне изобретений, в том числе В.А. Горохова (а.с. 1226008 «Способ контроля качества поверхности и устройство для его осуществления», а.с. 1665216 «Устройство для контроля качества поверхностей», патент РБ 3936 «Способ контроля микрогеометрии поверхности и устройство для его осуществления», патент РБ 4069 «Способ контроля шероховатости поверхности (варианты) и устройство для его осуществления»).

1.5.4. Измерение параметров движения и колебаний

Измерение частот вращения валов осуществляется посредством тахометров. Для измерения частоты вращения вала машины используются тахометры различных типов. Наиболее простой конструкцией отличаются механические тахометры. Характерным для них является то, что прибор потребляет энергию от самого объекта измерения, а показание получается непосредственно у места измерения или на небольшом расстоянии от него. По физическому принципу, положенному в основу этого измерения, различаются центробежные тахометры и тахометры на вихревых токах.

В центробежных тахометрах вращающийся маятник отклоняется под действием центробежной силы и через рычажную передачу приводит в движение стрелочный механизм. Отклонение стрелки является мерой частоты вращения. Погрешность измерения при этом составляет $\pm 0.5\%$.

Тахометр на вихревых токах имеет вращающийся постоянный магнит, поле которого возбуждает вихревые токи в алюминиевом

диске, соединенном с указателем. Возникающий при этом вращающий момент пропорционален частоте вращения магнита, и указатель перемещается до тех пор, пока момент, создаваемый вихревыми токами, не уравнивается моментом, созданным пружиной возврата. Тахометры данного типа измеряют частоту вращения только в одном направлении. Погрешность измерения составляет $\pm 1\%$.

Механические тахометры на вихревых токах могут измерять частоту вращения в пределах до 5000 мин^{-1} , центробежные — $30...50\,000 \text{ мин}^{-1}$.

Для соединения с объектом измерения на входной вал ручного тахометра в зависимости от конкретных условий насаживаются различные поводки, например, с резиновым заостренным наконечником 1 (рис. 1.33, а) или с обрезиненным роликом 2 (рис. 1.33, б), наружный диаметр которого должен быть согласован с диаметром вала так, чтобы передаточное отношение соответствовало шкале тахометра.

Кроме ручных тахометров, для измерения частоты вращения применяются также счетчики оборотов, указывающие число оборотов вала в течение заданного промежутка времени: 3 или 6 с.

Значительно удобнее для автоматизации обработки измерительных сигналов электрические тахометры. К ним относятся и тахометры с тахогенераторами, которые, как и механические тахометры, связываются с объектом измерения. Тахогенераторы вырабатывают непрерывный сигнал, пропорциональный измеряемой частоте вращения, который может передаваться на расстояние (дистанционно).

Выходной характеристикой тахогенератора постоянного тока с независимым электромагнитным возбуждением (рис. 1.34) является зависимость напряжения $U_{\text{я}}$ на зажимах 2 якоря 3 от частоты вращения якоря при постоянном магнитном потоке возбуждения $\Phi_{\text{в}}$

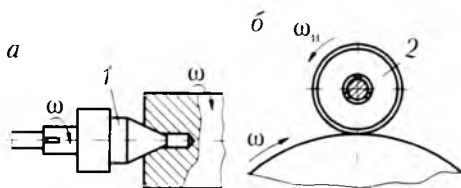


Рис. 1.33. Соединения тахометра с валом:

а — посредством резинового конуса; б — с помощью обрезиненного ролика

и постоянном сопротивлении нагрузки в показывающем индикаторе 1.

Чаще применяются тахогенераторы переменного тока. Их достоинством является отсутствие подвижных токосъемных деталей (щеток). Погрешность измерения тахогенераторов не превышает 1 %.

Наилучшими эксплуатационными характеристиками обладают бесконтактные тахометры. Связь такого тахометра с объектом измерения осуществляется индукционным, магнитным или фотоэлектрическим способом. При работе с бесконтактным фотоэлектрическим тахометром (рис. 1.35) на вращающийся объект 1 наносится светлая метка (М), отражающая способность которой значительно больше, чем остальной части поверхности объекта, освещаемого светом от источника 2. Отраженные импульсы воспринимаются фотоприемником 3. Частота импульсов, пропорциональная частоте вращения объекта, воспринимается частотным детектором 4, вырабатывающим сигнал, который преобразуется в индикаторе 5 в удобную для восприятия форму [21].

Тахометры используются также для измерения скорости линейного движения, которое при помощи зубчато-реечного или фрикционного зацепления превращается во вращательное. Для этой цели часто применяется обрезиненный ролик (см. рис. 1.33, б) и тахометр, шкала которого проградуирована непосредственно в единицах скорости.

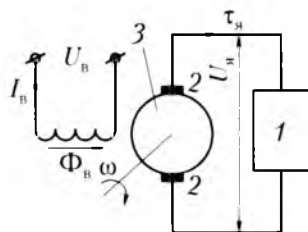


Рис. 1.34. Схема тахогенератора

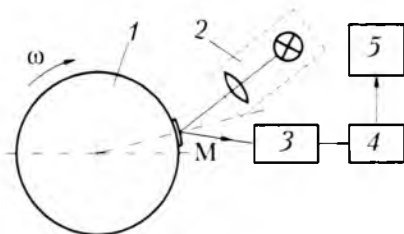


Рис. 1.35. Схема устройства бесконтактного фотоэлектрического тахометра

Под механическими колебаниями в данном случае понимается только периодическое изменение во времени параметров движения (перемещение, скорость, ускорение). Различаются детерминированные и стохастические колебания. В последнем случае процесс описывается случайной функцией и является следствием случайной совокупности различных причин. Цель измерения характеристик механических колебаний — получение информации об амплитуде, частоте и фазе параметров движения. В случае измерения характеристик стохастических колебаний определяются статистические оценки параметров движения (дисперсия, среднее значение максимальных и минимальных отклонений, вероятность всплесков, корреляционные и спектральные функции).

В настоящее время для измерения характеристик вибраций в основном применяют электрические и оптические измерительные приборы, однако находят применение и механические (особенно для измерения относительно низкочастотных вибраций). Принцип действия механических приборов описан ниже. Колебания объекта измерения 5 (рис. 1.36) воспринимаются механическим щупом 4 и передаются пишущему перу 2, которое записывает процесс колебаний на движущейся с заданной скоростью ленте 1. Предельная измеряемая частота колебаний зависит от жесткости пружины 3 и приведенной массы щупа 4 с пером 2. Устройство привода ленты находится в корпусе 6. Нижняя предельная измеряемая частота 3...5 Гц, а максимальная не превышает 250 Гц [21].

В электрических приборах измерительная цепь состоит из измерительного преобразователя, воспринимающего механические колебания и преобразующего их в электрические сигналы, усилителя

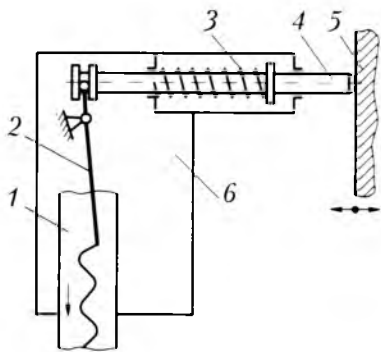


Рис. 1.36. Схема измерения колебаний механическими приборами

электрических сигналов (измерительной системы) и регистрирующего прибора. Для осуществления избирательного измерения какого-либо из параметров вибраций измерительный сигнал подается на соответствующий анализатор.

Корпусу 6 измерительного преобразователя абсолютных виброперемещений (рис. 1.37), который крепится к объекту измерения 1, сообщается движение последнего. При этом инерционный элемент 5, подвешенный на пружине 4, под действием сил инерции стремится сохранить состояние покоя. Однако на него через пружину действует сила, определяемая движением объекта. Перемещение груза 5 под действием этой силы зависит от соотношения собственной частоты колебаний системы груз — пружина и измеряемой частоты колебаний. Демпфер 7 расширяет диапазон измеряемых частот колебаний. В данном преобразователе отношение измеряемой частоты колебаний к собственной частоте колебаний инерционного элемента обычно больше $1,5 \dots 2$. Относительные перемещения инерционного элемента и корпуса измеряются при помощи индуктивного (или другого) преобразователя 3, который при помощи гибких проводов 2 подключается к измерительной схеме.

Кроме индуктивных, применяются электродинамические, электромагнитные и трансформаторные преобразователи. **Измерительные преобразователи (акселерометры)**, сигнал которых пропорционален виброускорению, являются основным средством измерения характеристик вибраций. Их широкое распространение обусловлено тем, что именно акселерометры обладают наиболее высокими эксплуатационными качествами. Знание же виброуско-

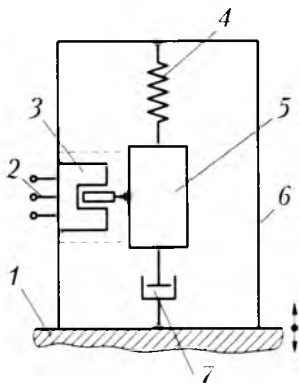


Рис. 1.37. Схема преобразователя абсолютных виброперемещений

рений позволяет сравнительно просто определить другие кинематические характеристики.

Принцип действия акселерометров аналогичен принципу действия преобразователя абсолютных виброперемещений. Однако их максимальная рабочая частота ниже частоты собственных колебаний инерционного элемента. Поэтому сила инерции груза слишком мала, чтобы удерживать его в неподвижном состоянии, как это имеет место в преобразователях виброперемещений. Сила инерции вызывает отклонения груза по отношению к корпусу, пропорциональные квадрату частоты, т.е. прямо пропорциональные ускорению. Эти отклонения можно измерять встроенным преобразователем перемещений. Для получения возможно более широкого диапазона рабочих частот акселерометра частота его собственных колебаний должна быть по возможности высокой (масса груза небольшой, а пружина очень жесткой). Диапазон рабочих частот оптимально демпфированных акселерометров находится в пределах от 0 до 60 % частоты их собственных колебаний [21].

Наибольшее распространение получили *пьезоэлектрические акселерометры* (рис. 1.38). Корпус 5 крепится к изучаемому объекту. Силы инерции, действующие на инерционный элемент (груз) 4, воспринимаются пьезоэлементами 1, которые могут работать в одном случае на сжатие (рис. 1.38, а), в другом — на сдвиг (рис. 1.38, б). В первом случае груз прижимается к пьезоэлементам при помощи крышки 3 и тарельчатой пружины 2.

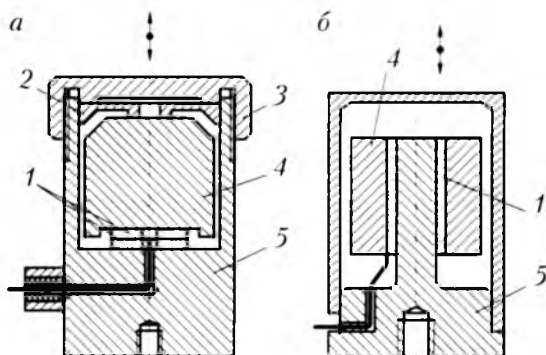


Рис. 1.38. Устройство пьезоэлектрических акселерометров

Современные акселерометры могут измерять виброускорения от 10^{-3} до 10^{-5} м/с² в диапазоне частот от 0,5 Гц до 50 кГц. Однако наиболее широко применяют акселерометры, рассчитанные на измерение ускорений до 10^4 м/с² с частотами до 10...15 кГц. Основная погрешность измерений 2...10 %. Масса некоторых акселерометров составляет десятые доли грамма.

Для уменьшения погрешностей измерения виброускорений высокой частоты необходимо резьбовое крепление акселерометра уплотнять клеем. Кабель следует закреплять, особенно в непосредственной близости от акселерометра. Чрезмерно высокая чувствительность прибора обуславливает увеличение нелинейных искажений. После первичного преобразователя рекомендуется включать фильтр, ограничивающий с обеих сторон рабочий диапазон частот.

В *тензорезисторных акселерометрах* инерционный элемент изгибает плоскую пружину, а проволочные тензорезисторы, наклеенные на пружину, изменяют свое сопротивление пропорционально ее деформации.

Во многих случаях хорошо себя зарекомендовали *бесконтактные измерительные преобразователи относительных виброперемещений*. Действие такого преобразователя (рис. 1.39) основано на том, что в находящемся в магнитном поле рабочей катушки 2 токопроводящем колеблющемся теле 1 (объекте измерения) возникают короткозамкнутые (вихревые) токи, отсасывающие энергию поля. Поэтому амплитуда переменного тока в рабочей катушке зависит от расстояния x до колеблющегося тела, электропроводности и магнитных свойств его материала. Катушка 3 установлена для температурной компенсации. Обе катушки изолированы от корпуса 6 изоляционными втулками 4 и 5 [21].

К бесконтактным относятся также оптические методы измерения параметров вибрации. В *лазерном измерительном преобразователе* виброскорости (рис. 1.40) излучение лазера 1, направляемое зеркалом 2 на поверхность колеблющегося объекта 10, модулируется по частоте в результате эффекта Доплера и попадает в интерферометр (обведен штриховой линией), где делится призмой 3 на два пучка, проходящих из-за несимметрии плеч разный путь. Первый пучок прямо идет к соединительной призме 4, а второй проходит более длинный путь от призмы 3 через зеркала 9 и 8.

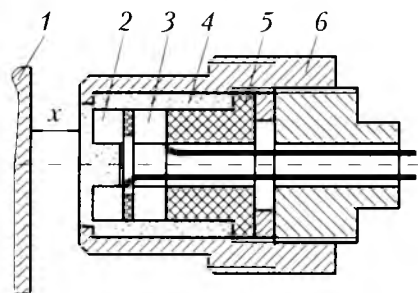


Рис. 1.39. Блок-схема лазерного преобразователя виброскорости

Соединяемые в призме 4 пучки создают интерференционную картину, перемещающуюся в результате изменения частоты отраженного излучения в ту или другую сторону. Щелевая диафрагма 5 ограничивает поле зрения фотопреобразователя 6 участком, меньшим по сравнению с расстоянием, между интерференционными полосами, что позволяет получать на выходе фототок, пропорциональный виброскорости объекта. Сигнал фотопреобразователя направляется в измерительную систему 7 для преобразования и индикации или регистрации.

Более совершенны интерферометры с преобразователями одночастотного излучения лазера в двухчастотное, так как в них легче осуществлять фильтрацию низкочастотных шумов фотоприемника и лазера.

Кроме описанных, для измерения параметров вибраций применяются также приборы с пространственным разделением и моду-

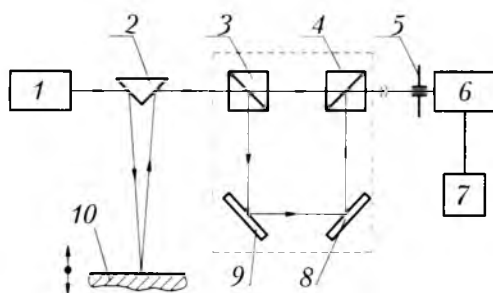


Рис. 1.40. Бесконтактный вихревой преобразователь относительных виброперемещений

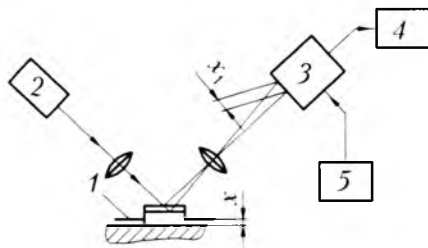


Рис. 1.41. Схема лазерного прибора измерения виброперемещений

ляцией излучения лазера. Работа таких систем (рис. 1.41) основана на пространственном смещении отраженного луча лазера 2, направленного под углом на колеблющийся объект 1. Это смещение, пропорциональное отклонению x объекта, обрабатывается позиционно-чувствительным фотоприемником 3 и измерительной системой 4. В случае измерения медленных смещений к фотоприемнику подключается модулятор 5. Частота переменного напряжения модулятора в 5–10 раз больше максимальной частоты колебаний объекта измерения. Исследования Ю.Ф. Застрогина показали, что минимальные значения вибросмещений, обнаруженные данным методом, составляют 0,5 мкм. Относительная погрешность измерений 0,15...0,4 %.

1.5.5. Измерение силовых и энергетических величин

Для измерения сил используют физические эффекты, в которых имеет место линейная зависимость между механической нагрузкой на чувствительный элемент преобразователя и другими величинами, например упругой деформацией, электрическим зарядом, магнитной проницаемостью и т.п. В большинстве методов используется линейная зависимость между силой и упругой деформацией пружин. Деформацию измеряют механическими или электрическими методами, описанными в п. 1.5.2. Упругий элемент вместе с приданными ему элементами (механическими, электрическими), выполняющими функции преобразования, образует **преобразователь силы (динамометр)**.

Механические динамометры применяются преимущественно для единичных измерений постоянных сил в тех случаях, когда

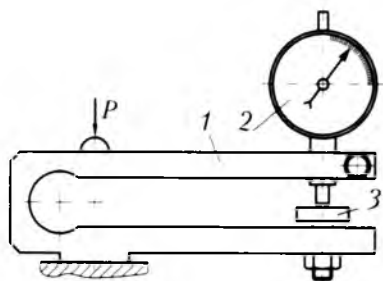


Рис. 1.42. Устройство механического динамометра

требования к точности сравнительно невелики. Пример простого механического динамометра показан на рис. 1.42. Под действием силы P скоба 1 деформируется. Упругая деформация измеряется индикатором часового типа 2. Установка прибора на нуль осуществляется при помощи винта 3 с контргайкой.

Среди *электрических динамометров* наибольшее распространение получили тензорезисторные, так как они пригодны для измерения сил в широком диапазоне значений (от 5 Н до 10 МН). Относительная погрешность измерения силы этими динамометрами зависит от качества измерительной схемы и может быть снижена до 0,03 %.

На рис. 1.43, а показан тензорезисторный преобразователь больших сил электрического динамометра. Тензорезисторы 3 наклеиваются на специально подготовленные места упругого элемента 1. Корпус 2 обеспечивает защиту тензорезисторов и закрепление выводных проводов. В данном случае упругий элемент работает на сжатие и его деформация передается проволочкам тензорезистора, активное сопротивление которых изменяется пропорционально этой деформации. Тензорезисторы включаются в измерительную (обычно мостовую или полумостовую) схему (рис. 1.43, б). Чтобы компенсировать влияние температуры на показания таких динамометров, применяют компенсирующие тензорезисторы, которые наклеиваются на ненагруженный элемент динамометра или перпендикулярно к направлению действия силы. Эти тензорезисторы позволяют также компенсировать сдвиг нуля, если они наклеиваются на деформируемую регулировочным винтом балочку.

Для измерения относительно небольших сил применяют чувствительные элементы, которые работают на изгиб (рис. 1.44).

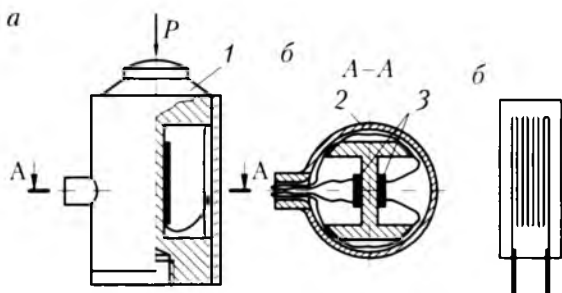


Рис. 1.43. Тензорезисторный измерительный преобразователь больших сил

В этом случае тензорезисторы 1 и 4 работают на растяжение, а тензорезисторы 2 и 3 — на сжатие. При их включении в мостовую схему (рис. 1.45) выходное напряжение

$$U = 0,25K(\epsilon_2 - \epsilon_1 + \epsilon_3 - \epsilon_4)U_s = K\bar{\epsilon}U_s,$$

где ϵ_i — относительная деформация i -го тензорезистора.

Как следует из последнего выражения, данная мостовая схема при одинаковых тензорезисторах гарантирует сохранение стабильности показаний, поскольку при изменении температуры все изменения упругой деформации в тензорезисторах будут одного знака и поэтому компенсируются.

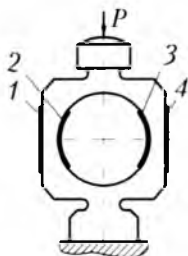


Рис. 1.44. Тензорезисторный измерительный преобразователь небольших сил

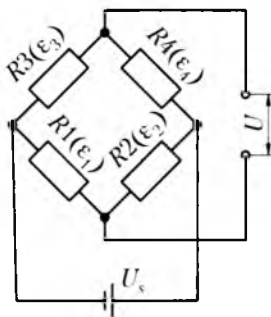


Рис. 1.45. Мостовая схема включения тензосопротивлений

Тензорезисторные динамометры пригодны для измерения как постоянных, так и переменных сил. Вследствие большой жесткости эти динамометры отличаются достаточно высокой частотой собственных колебаний, которая может достигать нескольких килогерц. Для суммирования или вычитания отдельных сил можно включать в одно плечо моста несколько тензорезисторов, соединенных последовательно и (или) группами.

Достаточно широко применяются динамометры, где упругая деформация чувствительного элемента измеряется индуктивными измерительными преобразователями. Такие динамометры обладают высокой чувствительностью и обеспечивают погрешность измерения в пределах от 0,2 до 1 %. С их помощью можно измерять силы от 10 мН до 20 кН. Однако температурная погрешность индуктивных динамометров несколько выше, чем тензорезисторных.

В настоящее время в промышленности широко используют магнитоупругие измерительные преобразователи силы, которые с успехом могут заменить тензорезисторы и индуктивные преобразователи. Магнитоупругие измерительные преобразователи при относительной простоте конструкции обладают высокой чувствительностью и надежностью. Они могут работать в самых тяжелых производственных условиях. Высокая жесткость магнитоупругих преобразователей соизмерима с жесткостью наиболее совершенных силовых измерительных преобразователей — пьезоэлектрических, но выходное сопротивление магнитоупругих преобразователей гораздо меньше, чем пьезоэлектрических, что облегчает создание тракта передачи информации и согласование преобразователя с другими элементами измерительной системы.

У магнитоупругих преобразователей возникающие в упругом элементе объемные напряжения, пропорциональные измеряемой силе, обуславливают изменение магнитных свойств упругочувствительного элемента, воспринимаемое катушкой индуктивности. При этом можно использовать один из двух принципов: генераторный и параметрический.

В первом случае механическая нагрузка вызывает изменение остаточной индукции постоянного магнита (или индукции при неизменной напряженности поля в сердечнике), которое способствует появлению ЭДС в измерительной обмотке. Во втором случае при механической нагрузке изменяется магнитное сопротивление

в сердечнике, а следовательно, и индуктивное сопротивление обмотки, надетой на сердечник. Механическая нагрузка модулирует электрическую энергию постоянного источника сравнительно большой мощности, поэтому для магнитоупругих преобразователей типична большая мощность сигнала. Генераторные магнитоупругие преобразователи применяются редко, а параметрические действуют с локализованным в пространстве или распределенным магнитным полем (анизотропные).

В магнитоупругих дроссельных измерительных преобразователях сердечник чувствительного элемента 1 под действием силы P сжимается (рис. 1.46, а). При этом изменяется его магнитная проницаемость (или индукция при данной напряженности магнитного поля), а следовательно, изменяется индуктивное сопротивление измерительной катушки 2. Магнитный поток замыкается через кожух 4, в котором смонтирован вывод 3 для проводов. В зависимости от конструкции преобразователя сердечник упругого элемента может иметь различную форму. Часто применяют сердечники из Ш-образных пластин, соединенных между собой. При этом уменьшаются потери на вихревые токи и существенно повышается рабочая частота преобразователя. Погрешность таких измерительных преобразователей не превышает 2,5 %.

Основным недостатком магнитоупругих измерительных преобразователей является наличие начального выходного напряжения при отсутствии входного воздействия. Для компенсации начального сигнала применяют дифференциальные схемы. На рис. 1.46, б показан дифференциальный дроссельный магнитоупругий преобразователь. Его чувствительный элемент 3 представляет собой два магнитопровода 2 и 1, соединенных последовательно. В среднем сечении элемента 3 имеется выступ, с помощью которого усилие

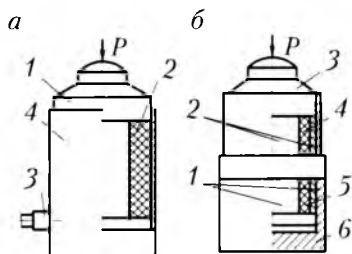


Рис. 1.46. Магнитоупругие дроссельные преобразователи сил

передается на стакан 6. Упругие напряжения сжатия возникают только в верхнем магнитопроводе 2. Нижний магнитопровод 1 является элементом сравнения, в нем упругих напряжений не возникает. Преобразователь имеет две дроссельные обмотки 4 и 5, которые питаются от сети через регулировочные резисторы. Выпрямленное напряжение на выходе зависит от разности полных сопротивлений катушек 4 и 5 и представляет собой линейную функцию от силы P . Эта схема осуществляет также термокомпенсацию при изменении температуры окружающей среды. Суммарная погрешность преобразователя не превышает $\pm 1\%$ [21].

Если к дроссельному преобразователю добавить дополнительную обмотку, то он становится трансформаторным (рис. 1.47, а). Трансформаторный преобразователь позволяет легко согласовать его параметры с нагрузкой и разделить цепи питания. Для трансформаторных магнитоупругих измерительных преобразователей также применяют дифференциальную схему включения (рис. 1.47, б). Обмотки 5 являются намагничивающими, а 3 — измерительными. Стакан 4 воспринимает нагрузку, приложенную к элементу 1 и передаваемую втулкой 2, которая составляет часть нагруженного магнитопровода. При дифференциальной схеме существенно увеличивается протяженность линейной части характеристики. Такой преобразователь рассчитан на нагрузку до $5 \cdot 10^4$ Н, основная погрешность измерений $\pm 2.5\%$.

Особый класс составляют магнитоанизотропные трансформаторные преобразователи. Сердечник преобразователя (рис. 1.48, а) представляет собой пакет пластин из магнитоупругого материала, на диагоналях которых симметрично расположены четыре отвер-

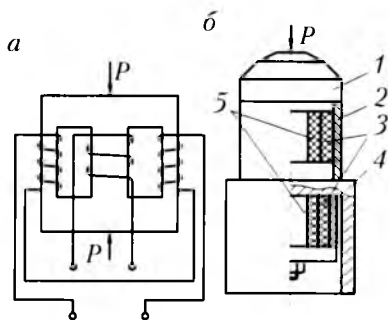


Рис. 1.47. Магнитоупругие трансформаторные измерительные преобразователи сил

ствия. В каждую пару отверстий укладывают обмотку. Плоскости обмоток располагают под углом 45° к направлению действия сил, сами обмотки взаимно перпендикулярны. Одна обмотка является намагничивающей, вторая — измерительной. При возбуждении намагничивающей обмотки в пакете пластин создается магнитное поле с индукцией B_0 (рис. 1.48, б), которое в центре пакета перпендикулярно к плоскости намагничивающей катушки и, следовательно, совпадает с плоскостью измерительной катушки. При этом ЭДС в измерительной катушке не наводится. При сжатии пакета в направлении оси y условия намагничивания по осям x и y становятся различными, а составляющие индукции неодинаковыми. Поэтому результирующий вектор поворачивается на небольшой угол относительно своего первоначального положения. При этом появляется составляющая индукции B_n , перпендикулярная к плоскости измерительной обмотки и вызывающая в ней ЭДС, пропорциональную приложенной нагрузке. Такие преобразователи с успехом применяются для измерения больших сил. При этом они отличаются большей стабильностью и меньшей погрешностью (не более 1 %) по сравнению с дроссельными преобразователями. Однако в изготовлении магнитоанизотропные преобразователи сложнее дроссельных.

Для увеличения мощности выходного сигнала целесообразно применять многоэлементные преобразователи, в которых измерительные обмотки включены последовательно (напряжения в отдельных обмотках суммируются).

Пьезоэлектрические измерительные преобразователи применяют обычно для измерения динамических сил. На рис. 1.49, а

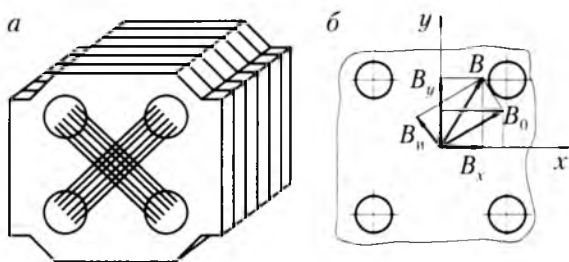


Рис. 1.48. Схема магнитотранзисторного трансформаторного преобразователя сил

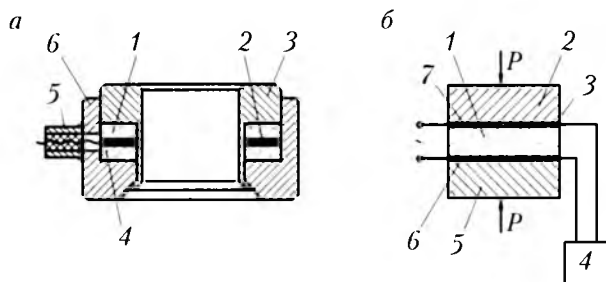


Рис. 1.49. Пьезоэлектрические измерительные преобразователи сил

приведена схема «измерительной шайбы». При ее нагружении силой вдоль оси на поверхностях кварцевых пластинок 1 и 4 появляется пропорциональный нагрузке электрический заряд. Элементы 3 и 6 шайбы создают предварительное нагружение пластинок за счет завальцовки, что необходимо для повышения жесткости преобразователя. Пластинки кварца прилегают друг к другу гранями противоположной полярности, т.е. они включены в электрическую цепь параллельно. Сигнал с электрода 2 снимается проводником через вывод 5 и при помощи усилителя с большим входным сопротивлением преобразуется в соответствующее электрическое напряжение. Такой преобразователь позволяет измерять динамические силы высоких частот (до 100 кГц). Погрешность измерения не превышает 1 % [21].

Для измерения статических и медленно, неперiodически изменяющихся сил можно применять **пьезоэлектрические резонаторы** или **пьезоэлектрические трансформаторы** [21]. На рис. 1.49, б показана схема пьезоэлектрического трансформатора, который представляет собой пьезоэлемент 1 с тремя электродами 7, 3 и 6, образующими две системы. Часть пьезоэлектрического трансформатора, подключенную к источнику питания, называют возбудителем, а часть, подключенную к измерительной схеме 4, — генератором. В возбудителе переменный ток за счет обратного пьезоэффекта преобразуется в энергию акустических волн, которые, зарождаясь на границах электродов, распространяются по всему объему трансформатора. В генераторе механическое напряжение за счет прямого пьезоэффекта преобразуется в электрический сигнал. Пьезоэлемент с электродами помещен между демпфирующими прокладками 2 и 5.

Под действием измеряемой силы P фактическая площадь упругого контакта между поверхностями пьезоэлемента и демпфирующих прокладок изменяется. Вследствие этого изменяются контактная жесткость системы и собственная частота преобразователя. Расчеты и эксперименты показывают, что входное напряжение генератора пропорционально фактической площади контакта пьезопластины с демпфирующими прокладками. Работа пьезоэлектрических трансформаторов может быть также основана на изменении резонансной частоты колебаний резонатора под действием измеряемой силы.

Крутящие моменты чаще всего измеряются непосредственно на вращающихся объектах, что представляет определенные трудности. Кроме того, следует учитывать, что любая исследуемая установка представляет собой колебательную систему и при измерении динамически изменяющегося крутящего момента измерительный преобразователь, действующий как торсионная пружина, может изменить колебательные характеристики всей установки.

Простейшими измерительными преобразователями крутящего момента являются механические, действующие по принципу измерения реакций опор. Пример такого преобразователя показан на рис. 1.50. Под действием движущего момента M и момента сопротивления M_c в опорах шестерни 3 возникает реакция R , пропорциональная измеряемому моменту $M \approx M_c$. Рычаг 1, в котором расположены опоры шестерни 3, опирается одним концом на динамометр 2, что позволяет измерить крутящий момент. Подобные преобразо-

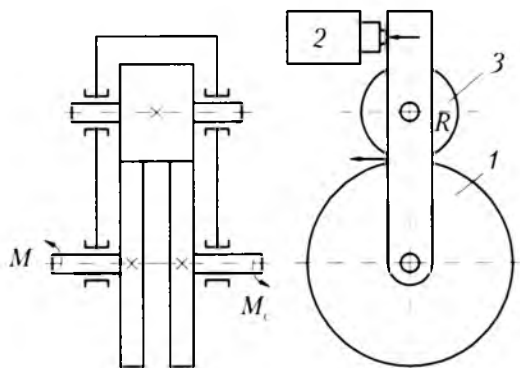


Рис. 1.50. Преобразователь крутящего момента механического действия

ватели применяются главным образом в стендах, предназначенных специально для измерения крутящих моментов.

На рис. 1.51 показана принципиальная схема **тензорезисторного преобразователя крутящего момента**. Такие преобразователи имеют широкий диапазон измерения (от $10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ до $50 \text{ Н} \cdot \text{м}$). Важнейшей частью преобразователя является цилиндрический чувствительный элемент (торсион) 7, который закручивается под действием приложенного к нему момента. Возникающие при этом деформации (или напряжение сдвига) служат мерой крутящего момента. Эти деформации воспринимаются тензорезисторами 3, которые приклеивают к чувствительному элементу под углом 45° к его продольной оси и включают мостовую измерительную схему через контактные кольца 2 и съемные щетки 6, поджимаемые к кольцам пружинами 5. Токосъемные щетки монтируются в неподвижном корпусе 4, который иногда связывают с валом 1 подшипниками. Контактная схема питания тензорезисторов и съема сигнала дает значительные погрешности, особенно при больших скоростях вращения. Тензорезисторные измерительные преобразователи крутящего момента с бесконтактным съемом сигнала имеют довольно сложную конструкцию. При этом на торсионе 7, кроме тензорезисторов, необходимо разместить элемент индуктивной передачи (катушки), блок выпрямления и стабилизации, преобразователь напряжения в частоту вращения и элемент емкостной связи [21].

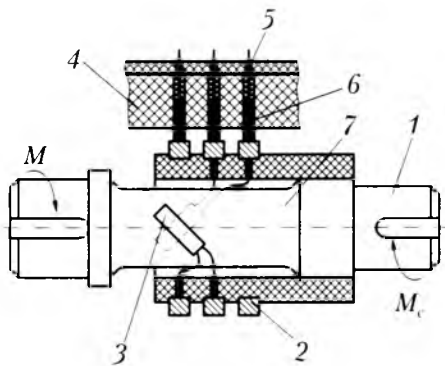


Рис. 1.51. Тензорезисторный измерительный преобразователь крутящего момента

Более простыми являются бесконтактные индуктивные измерительные преобразователи крутящего момента (рис. 1.52). Преобразователь состоит из ротора и статора. Ротор представляет собой торсионный вал 6, к которому при помощи трех дисков 7 из немагнитной стали крепятся три цилиндра 3, 1 и 5 из мягкой магнитной стали. Эти цилиндры являются частями магнитопроводов, разъединенных зазорами δ_1 и δ_2 между косыми зубцами. При нагрузке крутящим моментом цилиндры 1 и 5 смещаются относительно цилиндра 3 и при этом один из зазоров увеличивается (δ_2), а другой уменьшается, за счет чего изменяется магнитное сопротивление магнитопровода (пропорционально приложенному крутящему моменту и соответственному изменению сопротивления цепи измерительных катушек 2 и 4). Эти катушки соединены между собой по дифференциальной схеме. Точность измерения момента зависит от точности изготовления, сборки преобразователя и составляет 1...2 %.

Лучшими эксплуатационными характеристиками обладают магнитоупругие измерительные преобразователи момента. Они обеспечивают измерения в широком диапазоне частот вращения вала (до 6000 мин^{-1}) с точностью $\pm 0,25 \%$. Диапазон измерений ограничивается в основном механическими свойствами чувствительного элемента, а не характеристиками преобразователя. В общем случае магнитоупругие измерительные преобразователи имеют две системы: систему возбуждения, создающую внешний поток энергии, и измерительную систему, регистрирующую изменение направления легкого намагничивания или соответствующее ему

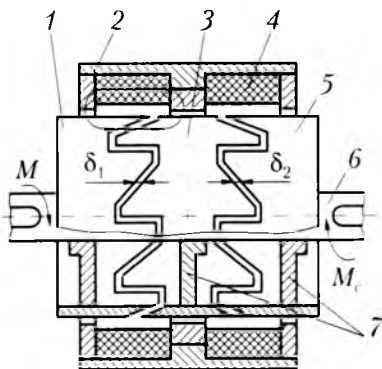


Рис. 1.52. Устройство бесконтактного индуктивного измерительного преобразователя крутящего момента

изменение магнитной проницаемости при определенной ориентации поля упругих напряжений.

При нагружении валов крутящим моментом наибольшие напряжения возникают на поверхности вала по направлениям, составляющим угол 45° с образующей и по которым, следовательно, будет иметь место наибольшее изменение магнитной проницаемости. Поскольку напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях имеют различные знаки (растяжение и сжатие), то наиболее эффективными будут дифференциальные измерительные схемы. Этот принцип использован в конструкции дифференциального магнитоупругого измерительного преобразователя (рис. 1.53), разработанного в Челябинском государственном техническом университете.

Внешнее магнитное поле создается катушками возбуждения 2, расположенными равномерно по окружности вала и соединенными встречно-последовательно так, что обеспечивается чередование магнитных полюсов. Вектор этого поля лежит в плоскости, перпендикулярной оси вращения. При отсутствии нагрузки ЭДС, наводимые в обеих измерительных секциях 3, при изотропных магнитных свойствах материала чувствительного элемента будут равны.

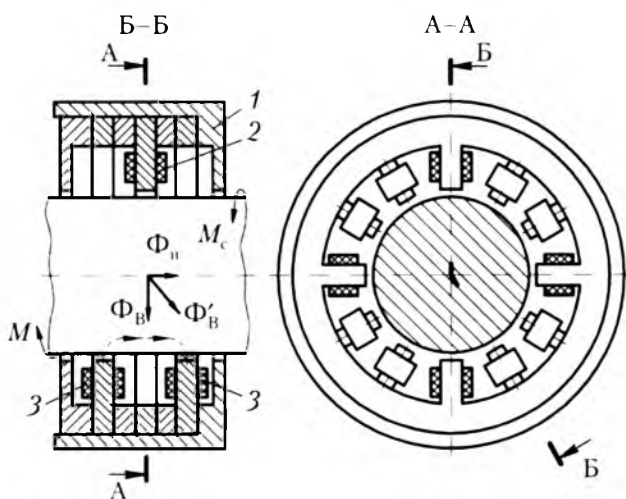


Рис. 1.53. Дифференциальный магнитоупругий преобразователь крутящего момента

Если эти сигналы выпрямить и произвести их алгебраическое сложение, то выходной сигнал измерительного преобразователя будет равен нулю. После приложения крутящего момента происходит изменение сигнала в каждой измерительной секции. При этом в секциях, расположенных над растянутыми волокнами, ЭДС увеличивается, а в секциях над сжатыми волокнами — уменьшается. Выходной сигнал равен разности этих ЭДС. При изменении направления приложения нагрузки выходной сигнал изменяет знак. В схеме предусмотрены потенциометры для установки нуля (для грубой и тонкой регулировки). Корпус 1 выполняется обычно из немагнитного материала.

На торсионном валу 1 фотоэлектрического измерительного преобразователя момента (рис. 1.54) закреплены диски 8 с радиальными прорезями. Эти диски вращаются вместе с валом. На статоре неподвижно укреплены: источник света 5, диафрагмы 3 и 6 с узкой щелью и фотоэлементы 2, 7. Лампа помещена посередине между дисками. При отсутствии крутящего момента прорези правого и левого дисков могут одновременно открывать щели диафрагм, через которые освещаются оба фотоэлемента одновременно. И в данном случае фототоки обоих фотоэлементов будут совпадать по фазе. При приложении крутящего момента происходит сдвиг щелей и освещение обоих фотоэлементов будет неодновременным, вследствие чего их фототоки будут сдвинуты по фазе. При номинальном значении крутящего момента угол сдвига фаз между фототоками равен 180° . Измерительная схема 4 фотоэлектрического преобразователя осуществляет измерение времени между импульсами фототоков, пропорционального приложенному крутящему моменту.

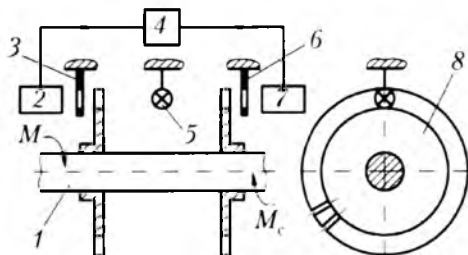


Рис. 1.54. Схема фотоэлектрического измерительного преобразователя крутящего момента

1.5.6. Измерение мощности

Мощность является важной характеристикой технологического процесса. Между силой резания, температурой в зоне резания или другими показателями технологического процесса и мощностью на валу электродвигателя существует тесная функциональная связь. Поэтому по мощности, потребляемой электродвигателем, можно косвенно судить об уровне значений различных параметров технологического процесса. Например, между мощностью, потребляемой из сети двигателем АО2-52-4, и крутящим моментом на его валу существует зависимость

$$\gamma_N = 0,03\gamma_M^2 + 0,93\gamma_M + 0,04,$$

где $\gamma_N = N/N_n$; $\gamma_M = M/M_n$; N и N_n — соответственно потребляемая и номинальная мощности; M и M_n — моменты на валу, соответствующие N и N_n .

С погрешностью не более 0,4 % эту зависимость можно заменить линейной:

$$\gamma_P = 0,036 + 0,96\gamma_M.$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети, должна быть преобразована в сигнал, удобный для регистрации или индикации. Измерительный преобразователь мощности должен произвести перемножение мгновенных значений тока I и напряжения U , чтобы получить значение мгновенной мощности. Интегрированием находится средняя мощность:

$$N = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} IU d\tau = IU \cos \varphi.$$

Наиболее часто используются измерительные преобразователи мощности, основанные на эффекте Холла (рис. 1.55). Пластина преобразователя 1 помещается в зазоре ферромагнитного сердечника 2, обмотка которого включена через добавочный резистор $R1$ в цепь напряжения. Магнитная индукция в зазоре является функцией мгновенного напряжения на зажимах электродвигателя. Одна пара электродов включена на напряжение, снимаемое с трансформатора тока 3, и поэтому через элемент Холла протекает ток, пропорциональный току статора двигателя. При этом напряжение,

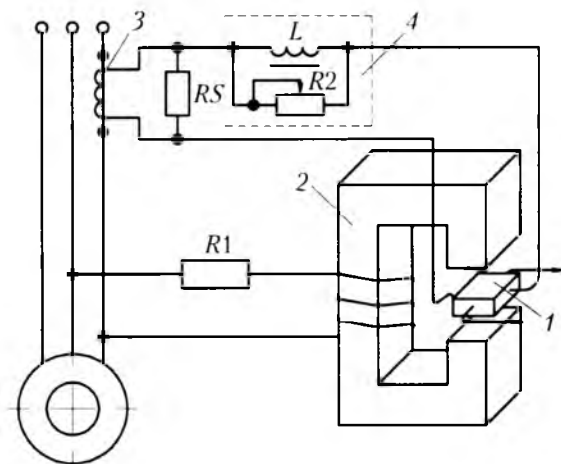


Рис. 1.55. Схема измерительного преобразователя мощности, основанного на эффекте Холла

снимаемое со второй пары электродов, пропорционально произведению тока и напряжения, т.е. мощности. Блок 4 регулировки фазовых отношений в цепи преобразователя состоит из дросселя L и реостата $R2$. Такие преобразователи при простой конструкции имеют небольшие габариты и обладают хорошими динамическими характеристиками. Погрешность измерений не превышает 2,5 %.

В машиностроении широко применяются преобразователи мощности, включающие нелинейные электрические элементы с квадратичной вольт-амперной характеристикой (рис. 1.56). На вход преобразователя с помощью трансформатора тока 1 и трансформатора напряжения 4 подаются два напряжения, пропорциональные току и напряжению в цепи статора двигателя. Трансформатор напряжения имеет две вторичные обмотки, на которых образуются равные напряжения, сдвинутые по фазе на 180° . Благодаря этому на вход квадраторов 3 и 2 подаются сигналы, пропорциональные сумме и разности входных напряжений U_1 и U_2 . Выходные напряжения квадраторов вычитаются. Тогда, согласно тождеству

$$(U_1 + U_2)^2 - (U_1 - U_2)^2 = 4U_1U_2,$$

выходной сигнал пропорционален произведению I на U , т.е. мгновенной мощности.

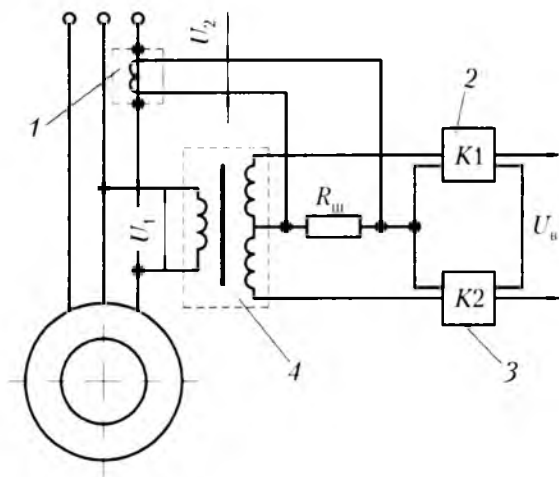


Рис. 1.56. Схема измерительного преобразователя мощности на нелинейных электроэлементах

1.5.7. Измерение температуры

Механические термометры основаны на явлении теплового расширения тел. Эти тела могут быть твердыми, жидкими или газообразными. Механические термометры отличаются надежностью, точностью, низкой стоимостью и простотой обслуживания. Считывание показаний с них, как правило, осуществляется на месте измерения. Однако с помощью механоэлектрического или механо-гидравлического преобразователя можно передать сигнал на ограниченное расстояние. В машиностроении чаще всего применяются биметаллические и жидкостные термометры.

Чувствительный элемент **биметаллических термометров** изготавливается из пластины, состоящей из двух или более слоев разнородных металлов, соединенных между собой по всей плоскости соприкосновения. Пластина может быть предварительно деформирована. При нагреве биметаллической пластины из-за различия коэффициентов линейного расширения материалов ее слоев возникает деформация изгиба, пропорциональная изменению температуры. На рис. 1.57 показаны наиболее распространенные конструктивные исполнения чувствительных биметаллических элементов.

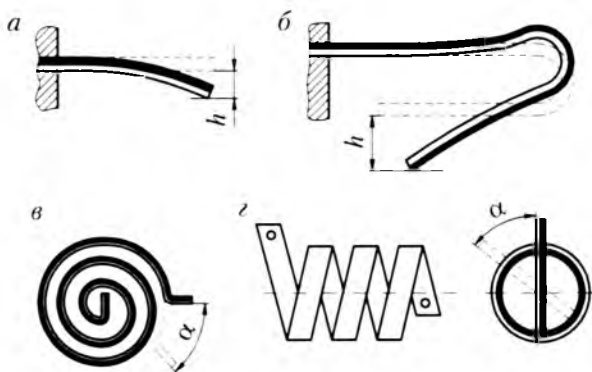


Рис. 1.57. Биметаллические преобразователи температуры

Варианты *а* и *б* используются главным образом в качестве реле температуры, *в* и *г* — для непосредственного отсчета показаний термометров. Для этого один конец чувствительного элемента закрепляется, а второй соединяется с передаточным или непосредственно с показывающим устройством. Диапазон измерения биметаллических термометров лежит в интервале от -50 до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем от 500 до $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ термометр можно использовать только кратковременно. Погрешность измерения от ± 1 до $\pm 3\%$.

В **жидкостных термометрах** измеряемой величиной, характеризующей температуру, является изменение объема термометрической жидкости. Термобаллон, в котором находится основная часть жидкости, изготавливается из стекла или стали. К термобаллону подключен капилляр диаметром $0,1\ldots 0,2\text{ мм}$. У стеклянного термометра капилляр находится рядом со шкалой непосредственного наблюдения. У жидкостных манометрических термометров капилляр подключен к манометру, показания которого пропорциональны температуре. Длина капилляра в таких термометрах может быть различной. Чувствительный элемент, капилляр и указатель в них образуют замкнутую, неделимую, герметичную термосистему, которая монтируется и демонтируется только целиком. Диапазон измерения термометров зависит от свойств термометрической жидкости:

- этиловый спирт — $-110\ldots 210\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- ртуть в вакууме — $-30\ldots 150\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- ртуть под давлением — $-30...630\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- толуол — $-90...110\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- толуол под давлением — $-90...230\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Погрешности измерения температуры при помощи жидкостных механических термометров обусловлены различием температур жидкости в термобаллоне и в капилляре и зависят также от длины капилляра. Для повышения точности в жидкостных манометрических термометрах применяют компенсационный капилляр. Погрешность в таком случае уменьшается с $\pm 2\%$ до $\pm 0,5\%$.

Основными недостатками механических термометров являются значительная инерционность и невозможность объединения с другими информационными сигналами для дальнейшей обработки. Поэтому в машиностроении температуру измеряют в основном термометрами, принцип действия которых основан на изменении электрических свойств веществ при изменении температуры.

Все виды электрических контактных термометров разделяются на две группы: термометры сопротивления, в которых с изменением температуры изменяется активное сопротивление чувствительного элемента, и термоэлектрические термометры (термопары), где при изменении температуры первичного преобразователя изменяется его термо-ЭДС.

У металлических проводников сопротивление обычно возрастает с повышением температуры, а у полупроводников — падает.

Чаще всего применяются платиновые или медные термометры сопротивления, каждый из которых обладает номинальным сопротивлением R_0 при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в пределах от 1 до 500 Ом. При температурах выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ зависимость сопротивления платиновых термометров от температуры имеет вид

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2),$$

где $A = 3,9685 \cdot 10^{-3}$; $B = -5,847 \cdot 10^{-7}$; T — абсолютная температура, К.

Область применения технических платиновых термометров $-260...1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температурная зависимость сопротивления медных термометров

$$R_T = R_0(1 + \alpha T),$$

где $\alpha = 4,28 \cdot 10^3$.

Медные термометры могут работать в интервале температур от -50 до 200 °С.

В чувствительных элементах платиновых и медных термометров сопротивления тонкая проволока ($0,05...0,1$ мм) наматывается на каркас изоляционного материала, например кварца, либо проволочная спираль помещается в керамический каркас, а пространство заполняется изолирующим порошком; таким образом обеспечивается герметизация чувствительного элемента.

Полупроводниковые термометры сопротивления выпускаются для измерения температуры в диапазоне от -200 до 300 °С. Обычно каждый такой термометр требует индивидуальной градуировки. Зависимость сопротивления полупроводниковых термометров от температуры приближенно описывается выражением

$$R_T = R_0 \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right),$$

где R_0 — сопротивление при эталонной температуре T_0 ; R_T — сопротивление при измеряемой температуре T ; B — параметр, зависящий от материала преобразователя ($B = 3000...4000$ К); T — абсолютная температура объекта, К.

Хотя большая нелинейность характеристики преобразователя является нежелательной из-за усложнения измерительной схемы терморезисторов, тем не менее полупроводниковые термометры сопротивления получили распространение в лабораторной и производственной практике благодаря высокой чувствительности, простоте, прочности, транспортабельности и возможности использования без дополнительного усилителя. Поскольку сопротивление полупроводниковых термометров лежит в интервале от 1 кОм до 1 МОм, то можно пренебречь изменением сопротивления клемм и соединительных проводов. Чувствительные элементы полупроводниковых термометров состоят главным образом из смесей окислов металлов, которые при высокой температуре сплавляются в форме маленьких пластинок, стерженьков или шариков. Благодаря малым размерам обеспечиваются хорошие динамические свойства таких термометров.

Для измерения сопротивления термометров используются автоматические мосты и логометры, питаемые постоянным, а иногда и переменным током. На рис. 1.58 показана схема измерительной

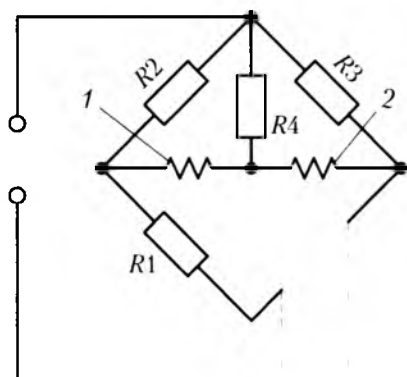


Рис. 1.58. Схема измерительной цепи металлического термометра сопротивления



цепи металлического термометра сопротивления с трехпроводной линией связи. Три плеча моста составляют манганиновые резисторы R_1 , R_2 и R_3 . Четвертое плечо состоит из преобразователя термометра RK и подгоночных резисторов (на схеме не показаны). Последовательное соединение каждого из подводящих проводов с резисторами R_1 и R_3 позволяет автоматически компенсировать влияние колебаний их температуры на результат измерения. Показания логометра, рамки которого 1 и 2 подключены к двум точкам моста непосредственно и к одной через резистор R_4 , пропорциональны изменению сопротивления первичного преобразователя температуры RK .

Погрешность металлических термометров сопротивления в зависимости от исполнения составляет от $\pm 0,5\%$ до $\pm 3\%$, а у полупроводниковых $\pm 0,5\%$. За счет специального отбора и индивидуальной градуировки можно снизить погрешность полупроводниковых термометров сопротивления до $\pm 0,01^\circ\text{C}$ [21].

Принцип действия **термоэлектрического термометра (термопары)** основан на термоэлектрическом явлении, в результате которого в цепи, состоящей из двух разнородных проводников,

возникает термо-ЭДС, зависящая от температуры в местах соединений этих проводников. Для измерения температуры одно из соединений разнородных проводников (рабочие концы) помещают в среду, температуру которой измеряют, а температура другого соединения (свободных концов) известна. Термо-ЭДС термоэлектрического термометра не изменится, если в его цепь будет включен третий проводник или измерительный прибор и температура мест его соединения будет одинаковой.

Свободные концы термоэлектрического термометра нужно располагать в месте, удобном для стабилизации или измерения температуры. Для этого применяют удлинняющие (компенсационные) провода, которые присоединяют к термоэлектродам.

Зависимость между термо-ЭДС и разностью температур рабочих и свободных концов в общем случае является нелинейной и может быть аппроксимирована уравнением третьей степени. Если сузить диапазон измеряемых температур, то характеристики многих термопар могут быть линеализованы (замена нелинейной системы на ее линейную модель) без большого ущерба для точности измерений.

Зависимость термо-ЭДС от измеряемой температуры для наиболее употребляемых пар материалов, характеристики которых приведены в табл. 1.42, показана на рис. 1.59 (температура свободных концов $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Таблица 1.42

Характеристики термоэлектрических преобразователей

Тип преобразователя	Материал термоэлектродов	Термоэлектроды		Диапазон измеряемых температур (длительно), $^{\circ}\text{C}$	Предел кратковременного применения, $^{\circ}\text{C}$
		положительные	отрицательные		
ТПП	Платинородий — платина	10 % Rh; 90 % Pt	100 % Pt	0...1300	1600
ТХА	Хромель — алюминь	Хромель	Алюмель	-50...1000	1300
ТХК	Хромель — конель	Хромель	Конель	-50...600	800

Если контрольная температура свободных концов отличается от нуля и поддерживается равной, например, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, то в измеренное значение термо-ЭДС следует внести поправку, которая соот-

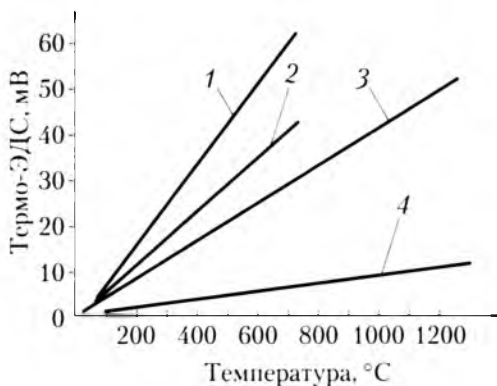


Рис. 1.59. Характеристики наиболее употребляемых термоэлектрических преобразователей:

1 — хромель — копель; 2 — железо — константан; 3 — хромель — алюмель;
4 — платинородий — платина

ответствует отклонению контрольной температуры T_0 от 0°C . Положительным считается тот электрод, от которого идет ток к спаю термопары при $T > T_0$. При обозначении термопары на первом месте указывается материал положительного электрода. Кроме указанных в табл. 1.42, применяются также железоконстантановые (диапазон измерения $-250...700^\circ\text{C}$) и медьконстантановые ($-250...400^\circ\text{C}$) термоэлектрические преобразователи.

Погрешность измерения температуры составляет от 0,25 % для преобразователей типа ТПП и до 0,8 % для ТХА [21].

Кроме стандартных термоэлектрических термометров, в лабораторной практике и при исследованиях находят применение и нестандартные. Но все нестандартные средства измерения температур требуют индивидуальной градуировки.

На рис. 1.60 приведена схема измерения температуры в зоне резания при помощи так называемых однорезцовой и двухрезцовой естественных термопар. Переключение режимов работы производится трехпозиционным переключателем 5. Для однорезцовой термопары замыкаются контакты $b-b$ или $c-c$. Тогда термо-ЭДС, образующаяся в месте контакта стружки из материала заготовки 1 и передней грани режущей пластинки резца 2 из стали Р18 (или резца 3 из твердого сплава Т15К6), измеряется, усиливается и регистрируется прибором 6. Для снятия термо-ЭДС с вращающейся

заготовки применяется ртутный токосъемник 7 с гибким вращающимся электродом. При замыкании контактов $c-c$ образуется естественная двухрезцовая термопара Р18-Т15К6. При замыкании контактов $b-b$ необходима изоляция 4 резца и заготовки, а для двухрезцовой термопары достаточно изолировать только резцы. Но при двухрезцовой обработке трудно создать одинаковые температуры в зоне резания обоих резцов, поскольку их материалы обладают разной теплопроводностью. Эксперименты А.Н. Резникова показали, что различие в показаниях одно- и двухинструментных термопар составляет 1...9 %. Правильное тарирование естественных термопар имеет большое значение, поскольку от его качества зависит достоверность результатов измерений, при тарировании желательно создать условия контакта, близкие к реальным, что особенно важно для инструмента, снабженного пластинками из твердых сплавов.

В Германии предложен способ (патент 105662) комбинированного тарирования. Установка (рис. 1.61, а) включает геометрически подобные резцы 1 (основной) и 4 (вспомогательный), изготовленные из разных инструментальных материалов. В схему входит токосъемник 3, переключатель 5 и измерительный прибор 6.

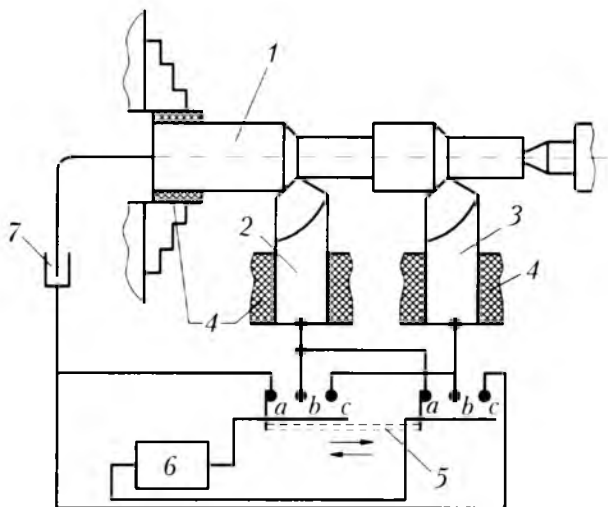


Рис. 1.60. Схема измерения температуры в зоне резания при помощи естественных термопар

Тарирование производят в несколько этапов. Вначале в патроне станка закрепляют образец 2 из сравнительно легкоплавкого материала, например алюминия, температура плавления t_1 которого известна. Переключатель 5 установлен в положение $K2$. Скорость резания плавно увеличивают до тех пор, пока в зоне резания материал обрабатываемого образца не начнет плавиться. ЭДС термотока E_1 фиксируется измерительным прибором 6. Если предположить в первом приближении, что зависимость между E и t линейная и $E = 0$ при $t = 0$ °С, то можно построить тарировочный график 7 (рис. 1.61, б) двухрезцовой термодпары (резцы 1 и 4 на рис. 1.61, а). Второй этап тарировки состоит в том, что в патрон станка устанавливают новый образец из испытываемого материала. При определенном режиме резания, используя двухрезцовую термодпару, замеряют ЭДС E_2 , по которой с помощью графика 7 определяют температуру в зоне резания t_2 . Затем вспомогательный резец отводится, а переключатель 5 ставится в положение $K1$. Основной резец 1 продолжает резание в прежнем режиме и на третьем этапе прибор фиксирует новое значение ЭДС E_3 , измеренное новой однорезцовой естественной термодпарой резец 1 – обрабатываемый материал. Это значение ЭДС соответствует температуре t_2 , так как условия резания для резца 1 не изменились. Полученная таким образом точка C позволяет построить тарировочный график 8 для однорезцовой термодпары.

На рис. 1.62 показана цепь однорезцовой естественной термодпары, позволяющей снимать показания без специального токо-

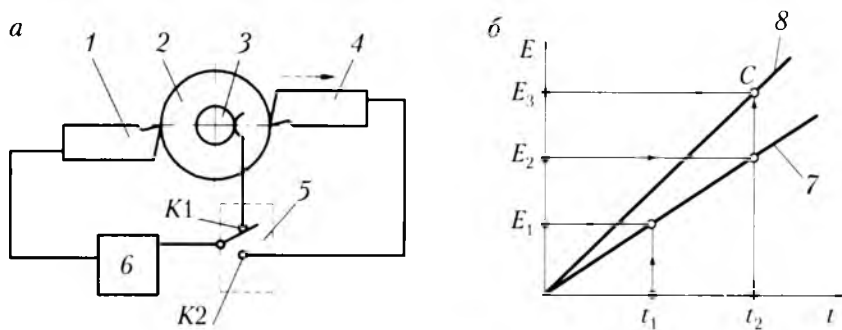


Рис. 1.61. Комбинированное тарирование естественной термодпары:
а – схема установки; б – тарировочный график

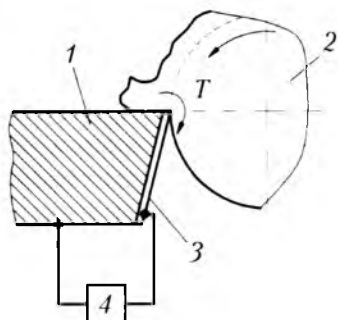


Рис. 1.62. Схема однорезцовый естественной термопары

съемника. Для этого на заднюю грань резца 1 наносится изоляционный слой, а на него — токопроводящий слой 3. ЭДС естественной термопары, образующейся в процессе резания между инструментом 1 и заготовкой 2, регистрируется измерительным прибором постоянного тока 4.

Известен способ Е.И. Махаринского измерения температуры в зоне шлифования при помощи полусинтетической термопары (рис. 1.63, а), которая образована двумя частями 1 и 2 шлифуемого на плоскошлифовальном станке образца и тонкой копелевой проволокой 3, изолированной от образца тонкими пластинками

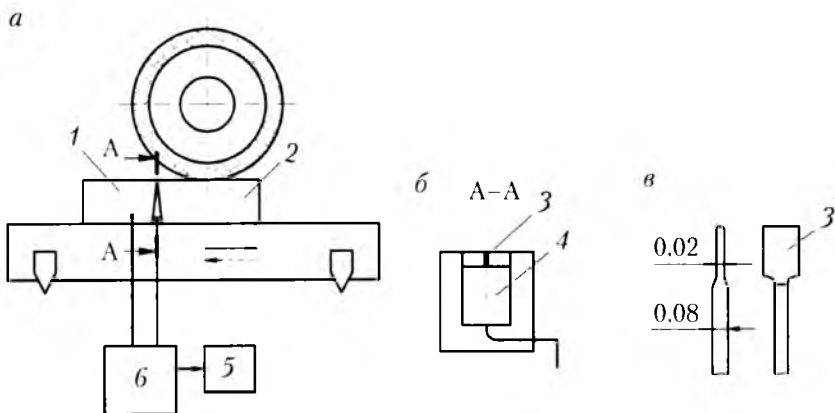


Рис. 1.63. Измерение температуры в зоне шлифования посредством полусинтетической термопары:

а — схема установки; б — схема заделки термоэлектрода; в — термоэлектрод

слюды 4 (толщина 0,02 мм). Расплющенный конец проволоки (рис. 1.63, б, в) заземляется между двумя половинками образца в верхней части клинового разъема. Спай образуется при шлифовании за счет пластического деформирования подповерхностного слоя материала заготовки и выходящей на поверхность части проволоки. Сигнал через усилитель 6 попадает на регистрирующее устройство 5 (например, осциллограф).

Полуискусственная термопара может быть получена и при установке одного из проводников в шлифовальный инструмент (рис. 1.64). Между двумя плотно притертыми друг к другу половинками шлифовального круга 4 и 2 укладывается фольга 3 толщиной 0,01...0,05 мм, которая образует с заготовкой 1 полуискусственную термопару с тонким спаем, равным по длине ширине зоны шлифования (1,5...3 мм). Сигнал термопары, соответствующий средней температуре зоны контакта, через ртутный токосъемник 5 попадает в усилитель 6 и затем в регистрирующий прибор 7. Преимуществом такой термопары является непрерывность и устойчивость сигнала излучения: термопары, термометры сопротивления, фотоэлементы, фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы. Чувствительность термопар и термометров сопротивления практически не зависит от длины волны, включая ультрафиолетовую и инфракрасную области излучения. Поэтому они пригодны для измерения сравнительно низких температур (до 1500 °С).

Бесконтактные методы измерения температуры наиболее приемлемы для практики. Поверхность всякого нагретого тела испу-

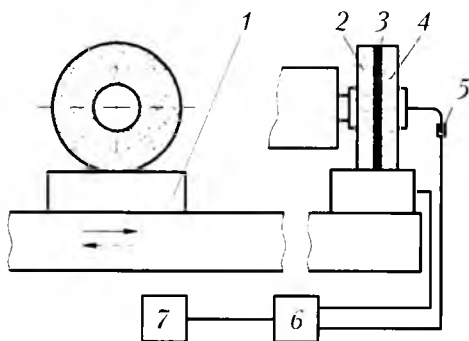


Рис. 1.64. Схема измерения температуры в зоне шлифования с термоэлектродом, вмонтированным в круг

скает электромагнитное излучение. Приборы, которые могут по тепловому излучению определять температуру излучателя, называют **пирометрами**. При помощи оптики излучение нагретого тела фокусируется и направляется на приемник. Различают следующие виды приемников теплового излучения: термопары, термометры сопротивления, фотоэлементы, фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы. Чувствительность термопар и термометров сопротивления практически не зависит от длины волны, включая ультрафиолетовую и инфракрасную области излучения. Поэтому они пригодны для измерения сравнительно низких температур (до 1500 °С). Остальные приемники излучения являются чувствительными только в узком спектральном интервале, их характеристики сильно зависят от длины волны. Но абсолютная чувствительность у них существенно больше, чем у термопар или термометров сопротивления.

Пирометрические оптические устройства создают изображение излучающей поверхности (или ее участка) на приемнике и тем самым делают измерение потока излучения в широком диапазоне независимым от расстояния до изучаемого объекта. Линзы ограничивают и неравномерно пропускают измеряемое излучение, коэффициент пропускания зависит от длины волны. Использование линз становится неприемлемым при измерении сравнительно низких температур, когда излучаются волны большой длины (инфракрасный диапазон). В этих случаях следует использовать вогнутые зеркала [21].

Радикационные пирометры (пирометры полного излучения) — приборы, которые воспринимают излучение во всем спектральном диапазоне и преобразовывают его в соответствующий сигнал. Излучение (рис. 1.65) через защитную пленку 6, пропускающую инфракрасные лучи, попадает на сферическое зеркало 4, которое фокусирует его на теплоприемнике 5, представляющем собой звездообразную термобатарейку из ряда последовательно соединенных V-образных хромель-копелевых или нихром-константановых термопар 2. Свободные концы термопар приварены к металлическим полоскам 1, которые приклеены к кольцу 3 из слюды. Это кольцо закладывается между двумя такими же. Плоские рабочие концы термопар образуют венчик, зачерненный с одной стороны. На этот венчик фокусируется излучение.

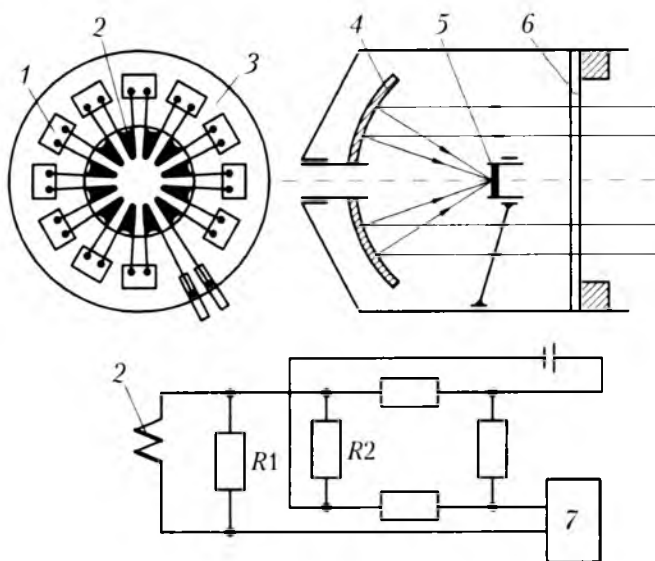


Рис. 1.65. Схема радиационного пирометра

С повышением измеряемой температуры растет погрешность измерения за счет влияния температуры кожуха. Для компенсации температурной погрешности термобатарея подключается к измерительному прибору 7 через ряд резисторов. Резисторы $R2$ и $R1$ выполняются из меди или никеля и располагаются возле концов термобатареи, остальные плечи моста выполнены в виде резисторов из манганина. Мост компенсирует постоянную составляющую погрешности, а резистор $R1$, включенный параллельно термобатарее, компенсирует переменную составляющую, связанную с изменением температуры.

Для приборов с пределами измерений 400...1200 °С вместо сферического зеркала применяют линзы из кварцевого стекла, характеризующегося малым поглощением инфракрасных лучей.

Применение радиационных пирометров возможно лишь в тех случаях, когда полная мощность излучения объекта измерения мало отличается от полной мощности излучения абсолютно черного тела при той же температуре. Большинство закрытых печей и топок с небольшими отверстиями и окнами удовлетворяют этому условию.

В промышленности и исследованиях применяются также *цветовые пирометры*. В них определяется отношение интенсивностей излучения данного тела в лучах двух заранее выбранных длин волн. Это отношение для каждой температуры будет различным и вполне однозначным. Следовательно, оно может служить критерием абсолютной температуры тела. Цветовые пирометры применяются, как правило, с фотоэлементом, т.е. являются фотоэлектрическими пирометрами. Преимущества их перед радиационными — уменьшение погрешности, связанной с неполнотой излучения; независимость показаний от расстояния до излучающей поверхности и размеров последней.

Принцип действия фотоэлектрического цветового пирометра иллюстрирует рис. 1.66. Излучение от объекта исследования 1 линзой 2 фокусируется на обтюраторе (заслонка, периодически перекрывающая световой поток) 3, который (которая) вращается синхронным электродвигателем 4, и затем воспринимается фотоэлементом 5. На диске обтюратора имеется ряд отверстий, половина которых закрыта красным светофильтром, а половина — синим. Таким образом, на фотоэлемент поочередно попадают то красные, то синие лучи. Кроме того, благодаря отверстиям фототок оказывается промодулированным с несущей частотой, определяемой числом отверстий в обтюраторе и частотой вращения последнего. Модулированный ток в нагрузке фотоэлемента через усилитель 6, который снабжен устройством 7 для автоматической регулировки чувствительности, поступает в фазочувствительный выпрямитель 8. После этого с помощью коммутатора 9 сигнал разделяется соответственно отношению интенсивностей красных и синих лучей и воспринимается измерителем отношения 10. Необходимость в регулировке чувствительности усилителя, т.е. в стабилизации выходного напряжения, обусловлена тем обстоятельством, что при повышении измеряемой температуры яркость излучения как в синей, так и в красной области спектра возрастает значительно сильнее, чем отношение этих яркостей. При надлежащем режиме работы фотоэлемента фотоэлектрические цветовые пирометры могут обеспечить измерение температуры с погрешностью, не превышающей 1 %.

Цветовые индикаторы температуры (термоиндикаторы) — это вещества, изменяющие свой цвет в зависимости от температуры.

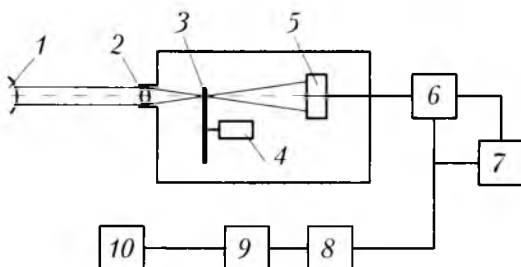


Рис. 1.66. Схема фотоэлектрического цветного пирометра

По принципу действия термоиндикаторы подразделяются на четыре основных типа: термохимические; плавления; жидкокристаллические; люминесцентные.

Термохимические индикаторы — сложные вещества, которые при достижении определенной температуры резко изменяют свой цвет за счет химического взаимодействия компонентов. Они обеспечивают точность измерения температуры в пределах от 5 до 10 °С.

Термоиндикаторы плавления изменяют цвет в результате плавления одного или нескольких компонентов, имеющих строго определенную температуру плавления. Погрешность измерения температуры этими индикаторами составляет 0,5...1,5, реже 2,5 %, что примерно соответствует точности измерения температуры наиболее распространенными измерительными приборами.

Жидкокристаллические термоиндикаторы — вещества, которые в определенном интервале температур переходят в жидкокристаллическое состояние и обладают свойством при незначительном изменении температуры (иногда в пределах десятых долей градуса) так изменять свою структуру, что падающий на них луч света разлагается и отражается с изменением цвета.

Люминесцентные термоиндикаторы в зависимости от температуры изменяют либо яркость, либо цвет, либо цветовой тон излучения. Погрешность измерения температуры термоиндикаторами двух последних типов составляет 0,1...0,5 %.

По способности к физико-химическим превращениям термоиндикаторы делятся на три группы: обратимые, необратимые и квазиобратимые. К обратимым относятся термоиндикаторы, которые, изменяя цвет после нагревания до или выше температуры перехода, восстанавливают первоначальный цвет при понижении

температуры ниже критической. Такие термоиндикаторы можно использовать многократно. Необратимые индикаторы указанным свойством не обладают и их первоначальный цвет после охлаждения не восстанавливается. Квазиобратимые термоиндикаторы восстанавливают первоначальный цвет при понижении температуры постепенно, под воздействием влаги, имеющейся в воздухе. Их также можно использовать многократно.

Термоиндикаторы плавления являются только необратимыми, а жидкокристаллические и люминесцентные — обратимыми. Термохимические индикаторы могут быть обратимыми, необратимыми и квазиобратимыми.

Ряд термоиндикаторов имеет один строго определенный температурный переход, другие — несколько. Термоиндикаторы плавления изменяют свой цвет однократно, остальные — многократно.

Серийно выпускаются термоиндикаторы трех типов: термохимические в виде краски и карандашей; термоиндикаторы плавления в виде краски; жидкокристаллические в виде порошка или его раствора в хлороформе.

В состав всех термоиндикаторов входят четыре компонента: термопигменты, связующие, растворители и наполнители. Термопигменты являются обязательной составной частью термоиндикаторов. Состав и характеристики некоторых термопигментов, входящих в состав термохимических необратимых индикаторов, приведены в табл. 1.43, 1.44, а термопигментов, входящих в состав термоиндикаторов плавления — в табл. 1.45. Одни вещества из приведенных в табл. 1.43 при плавлении меняют лишь цветовой оттенок, другие резко изменяют цвет.

Таблица 1.43

**Характеристики необратимых термопигментов,
однократно изменяющих цвет**

Название и химическая формула	Цвет до нагрева	Температура перехода, °C	Цвет после нагрева
Фторсиликат кобальта CoSiF_6	Бледно-розовый	100	Ярко-розовый
Метаванадий аммония NH_4VO_3	Белый	150	Коричневый
Азотнокислый свинец $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	Бесцветный	215	Красный
Кобальт щавелевокислый CoC_2O_4	Светло-красный	280	Черный

Окончание табл. 1.43

Название и химическая формула	Цвет до нагрева	Температура перехода, °С	Цвет после нагрева
Карбонат кадмия CdCO_3	Белый	360	Коричневый
Оксид свинца PbO	Красный	489	Желтый
Сульфид кобальта CoS	Серый	680	Красный

Таблица 1.44

Характеристики необратимых термопигментов, многократно изменяющих цвет

Название и химическая формула	Цвет до нагрева	Температура перехода, °С	Цвет после нагрева
Кобальт-аммоний фосфорнокислый $\text{NH}_4\text{CoPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Пурпурный	140 500	Синий Серо-голубой
Тиосульфит натрия $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	Бесцветный	300 600	Желтый Темно-желтый
Пирофосфат марганца аммония $\text{NH}_4\text{MnP}_2\text{O}_7$	Фиолетовый	320 480	Серый Белый
Комплексное соединение $3(\text{NH}_4)_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{MoO}_3 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	Белый	110 300 380	Бледно-желтый Черный Темно-желтый
Смесь карбоната кадмия с серой 2 части CdCO_3 + 1 часть S (по массе)	Белый	275 370 410	Коричневый Черный Кирпичный

Таблица 1.45

Характеристики термопигментов для индикаторов плавления

Название и химическая формула	Цвет до нагрева	Температура плавления, °С
Цинк бромноватокислый $\text{Zn}(\text{BrO}_3)_2$	Бесцветный	100
Аммоний роданистый NH_4SCN	Бесцветный	149.6
Медь сернокислая CuSO_4	Зеленовато-белый	200
Натрий муравьинокислый NaHCO_2	Белый	283
Селен хлористый SeCl_2	Бесцветный	305
Кадмий азотнокислый $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$	Бесцветный	350
Натрий сернокислый $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$	Белый	400.9

Окончание табл. 1.45

Название и химическая формула	Цвет до нагрева	Температура плавления, °С
Перекись бария BaO_2	Бесцветный	450
Медь бромистая CuBr_2	Черный	498
Калий ренийоокислый KReO_4	Белый	550
Железо йодистое FeI_2	Серый	592
Олово селенистое SnSe_2	Белый	650
Литий молибденовокислый Li_2MoO_4	Белый	705
Свинец кремнекислый PbSiO_3	Бесцветный	766
Германий сернистый GeS_2	Белый	800
Натрий углекислый Na_2CO_3	Белый	852
Кальций азотистый Ca_3N_2	Коричневый	900
Калий борнокислый $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Бесцветный	947
Железо мышьяковистое FeAs_2	Серебряно-серый	990

Температура перехода термондикаторов зависит от условий нагрева. С увеличением скорости нагрева и давления она несколько увеличивается.

Термондикаторы наносятся на поверхность объекта исследования в виде тонкой пленки. В зависимости от способа подвода тепла к объекту температура индикатора несколько выше или ниже измеряемой. Но это различие незначительное.

1.5.8. Осуществление механических испытаний

Испытания статическим нагружением используются для выявления ряда характеристик материалов. При статических испытаниях для определения характеристик прочности и пластичности исследуемый образец подвергается действию постоянной или медленно и плавно увеличивающейся нагрузки, что дает возможность измерять с достаточной точностью нагрузку, приложенную к образцу, и деформацию последнего в любой момент испытания. Наиболее распространенным является испытание на растяжение. При этом гладкий ненадрезанный образец растягивают в испытательной машине в направлении его оси до разрыва, а зависимость между растягивающей силой и изменением длины образца регистрируют

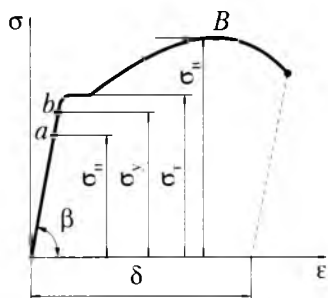


Рис. 1.67. Диаграмма растяжения стали

в виде диаграммы нагрузка — абсолютное удлинение. Если нагрузку P отнести к исходной площади поперечного сечения образца A_0 , а удлинение Δl — к начальной расчетной длине l_0 , то получится диаграмма «напряжение — относительное удлинение» (рис. 1.67).

На начальной стадии испытания относительно удлинение пропорционально напряжению (до точки a). Этот участок диаграммы позволяет определить модуль упругости

$$E = \frac{m_1}{m_2} \operatorname{tg} \beta,$$

где m_1 — масштаб напряжений, МПа/мм; m_2 — масштаб относительных деформаций, мм^{-1} ; β — угол наклона прямолинейного участка диаграммы.

Предел упругости σ_y является максимальным напряжением, при котором после разгрузки образца не наблюдаются остаточные пластические деформации. Точно определить этот параметр практически невозможно, поэтому техническим условным пределом упругости ($\sigma_{0,01}$) называют напряжение, при котором относительная остаточная деформация составляет 0,01 %.

Текучесть металла проявляется и увеличивается при постоянном напряжении. Соответствующее напряжение называют пределом текучести σ_T . Для материалов без четко выраженной площадки текучести определяют условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), который соответствует относительной остаточной деформации 0,2 %.

При напряжениях, превышающих предел текучести, зависимость между деформациями и напряжениями нелинейна. Когда способность к деформированию образца исчерпана, наступает разрушение при нагрузке, соответствующей участку подъема кривой «напряжение — деформация», либо (у пластичных материалов) при деформации, соответствующей снижающемуся участку кривой на диаграмме растяжения. Максимальное условное напряжение — отношение максимальной растягивающей силы к начальной

площади поперечного сечения образца — называют временным сопротивлением σ_B .

Испытания на растяжение позволяют также оценить пластические свойства материала, которые характеризуются обычно относительным удлинением δ и относительным сужением ψ после разрыва образца. Аналогичные характеристики получают при испытании на сжатие, изгиб и кручение.

Для оценки поведения материала при повышенных температурах проводятся испытания на длительную прочность — до тех пор, пока при данной температуре и нагрузке не будет достигнута максимальная остаточная деформация или произойдет разрушение образца.

При этих испытаниях определяют предел длительной прочности и предел ползучести. Пределом длительной прочности называют максимальное (условное) напряжение, которое может выдерживать образец без разрушения при данной температуре в течение неограниченно долгого времени. Предел ползучести при определенной температуре — максимальное (условное) напряжение, при котором скорость ползучести за определенное время испытания (25...35 ч) не превосходит 10^{-4} %/ч. При этом относительное остаточное удлинение не должно превышать 0,2 % после 45 ч испытания под нагрузкой. Пределы прочности и ползучести определяют для сталей в интервале температур 350...700 °С.

Испытания ударной нагрузкой (на изгиб) позволяют оценить сопротивление хрупкому разрушению вязких материалов. Для этого стандартный образец (рис. 1.68, а), свободно установленный на опоры копра, разрушается за один удар тяжелого маятника по стороне, противоположной надрезу (рис. 1.68, б). Кроме U-образного концентратора, показанного на рис. 1.68, применяются V-образные с углом раствора 45° и радиусом скругления 0,25 мм. Скорость маятникового копра в момент соударения зависит от угла падения α и обычно лежит в интервале 5...7 м/с.

Количественной характеристикой вязкости при ударном разрушении является отношение работы W_K , необходимой для разрушения образца, к площади его поперечного сечения A_0 , измеренной в плоскости симметрии надреза. Этот параметр $a_K = W_K/A_0$ (Дж/м²) округляют до целого числа и называют *ударной вязкостью*.

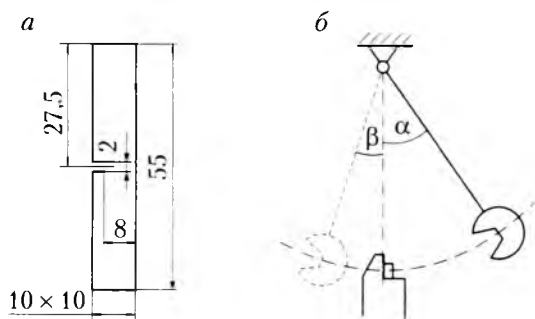


Рис. 1.68. Испытание образца на ударную вязкость:
а — образец; б — схема испытания

Поглощенную при разрушении образца работу можно определить по формуле

$$W_K = mgl(\cos\beta - \cos\alpha),$$

где m — масса маятника копра; g — ускорение свободного падения; l — длина маятника; β — угол подъема маятника после разрушения образца.

Ударная вязкость стали зависит от температуры (рис. 1.69). В диапазоне температур, меньших t_1 , происходит хрупкий излом, а больших t_2 — вязкий. Если $t_1 < t < t_2$, то наблюдается смешанный излом. Значение $t_2 - t_1$ зависит от структуры стали, вида ее термической обработки, предварительной холодной пластической деформации образца и его старения.

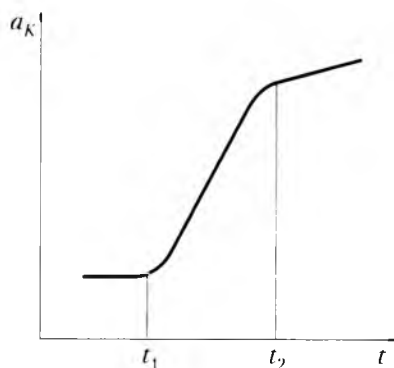


Рис. 1.69. Зависимость ударной
вязкости стали
от температуры испытания

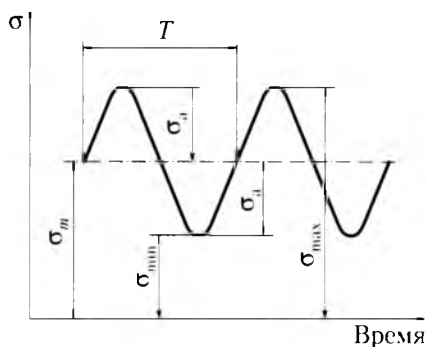


Рис. 1.70. Схема измерения нагрузки на образец при испытании на усталость

Кроме испытания ударом на изгиб (но значительно реже), применяют испытание ударом на растяжение и скручивание.

Испытания циклической нагрузкой осуществляют на образцах, в которых происходит постепенное накопление повреждений, приводящих к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению. Этот процесс называют **усталостью**. Параметрами циклического нагружения являются (рис. 1.70): среднее напряжение цикла $\sigma_m = 0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$, амплитуда напряжения σ_a , частота циклов f (или период T цикла), коэффициент асимметрии $R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$. Цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения равны, но противоположны по знаку, называется **симметричным**.

Схема нагружения должна в той или иной мере воспроизвести в образцах напряженное состояние, характерное для эксплуатационных условий работы детали, так как от соотношения касательных и нормальных напряжений зависит сопротивление усталостному разрушению и характер разрушения.

Характеристиками сопротивления усталости материала являются: предел выносливости σ_R — максимальное напряжение цикла с коэффициентом асимметрии R , соответствующее заданному (базовому) числу циклов напряжения; предел выносливости при симметричном цикле σ_{-1} ; циклическая долговечность N — общее число циклов, выдержанных нагруженным объектом до образования усталостной трещины определенной протяженности или до усталостного разрушения.

Для определения предела выносливости испытывают 10–15 одинаковых образцов. Для первого образца максимальное напряжение

обычно составляет $0.75\sigma_B$. Определяется число N_1 циклов нагружения, которое он выдерживает до разрушения. Напряжения при испытании второго образца назначаются в зависимости от значения N_1 . Если $N_1 < 2 \cdot 10^5$, $\sigma_2 = \sigma_1 - 20$ МПа, то испытание второго образца назначают при $N_1 > 2 \cdot 10^5$, $\sigma_2 = \sigma_1 + 20$ МПа. Максимальное напряжение цикла для каждого последующего образца понижается на 8...12 % до тех пор, пока i -й образец не выдержит без разрушения базовое число циклов нагружения.

Уточнение предела выносливости производится при испытании нескольких других образцов, для которых $\sigma_{i+1} = 0.5(\sigma_i + \sigma_{i-1})$. На уровне предела выносливости должно быть испытано не менее трех образцов. По результатам испытаний строится кривая усталости (рис. 1.71). Критическое напряжение σ_K , выше которого уже с первых циклов нагружения возникают субмикроскопические трещины и отсутствует инкубационный период, делит диапазон $\sigma_{i-1} \dots \sigma_B$ на две области — малоцикловой и многоцикловой усталости.

Для сокращения трудоемкости испытаний на усталость разработан ряд прямых и косвенных ускоренных методов. Наиболее распространенным является метод ступенчатого нагружения, который основан на гипотезе о линейном характере накопления усталостных повреждений. В данном случае на каждом уровне периодически повышаемой на величину $\Delta\sigma$ амплитуды напряжений осуществляется n_i циклов нагружения. Испытание продолжается до разрушения образца. Полученные результаты позволяют определить искомый предел выносливости.

В косвенных методах используется связь предела выносливости с другими характеристиками механических свойств материалов

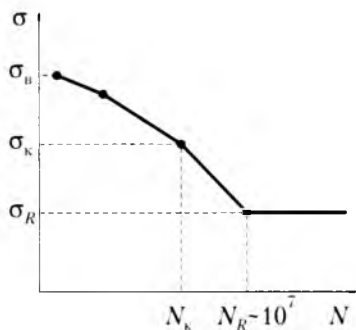


Рис. 1.71. Типовой график результатов испытаний на усталость

или резкое изменение некоторых параметров при достижении предела выносливости. В первом приближении значение σ_{-1} можно определить по формуле

$$\sigma_{-1} = 5 + 0,25(\sigma_{\text{в}} + \sigma_{\text{т}}).$$

Другой косвенный метод заключается в измерении температуры образца, который испытывается при непрерывном возрастании амплитуды напряжений. При достижении напряжения, равного пределу выносливости, нарушается линейная зависимость между амплитудой напряжений и температурой.

Однако косвенные методы не могут выявить влияние на предел выносливости микрогеометрии поверхности образца или коррозии. Прямые же методы показывают, что предел выносливости полированного образца на 27 % больше, чем у обточенного. При коррозии предел выносливости может снизиться в 4–6 раз.

Измерение твердости относится к наиболее распространенным видам механических испытаний материалов. Это обусловлено относительной простотой методов измерения и возможностью по твердости приблизительно оценить характеристики других механических свойств материала. Методы измерения твердости основаны на том, что в испытуемый материал вдавливают индентор, а пластическую деформацию при этом рассматривают как меру твердости. Наиболее распространенными инденторами являются: закаленный шарик, алмазный конус и четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине 136° (рис. 1.72).

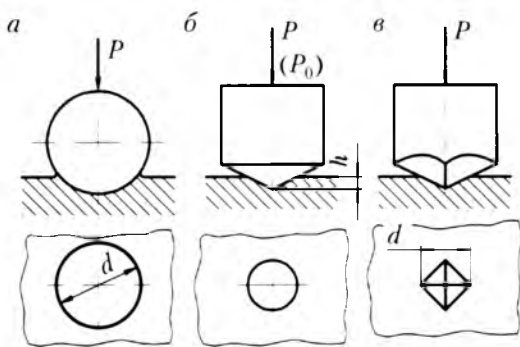


Рис. 1.72. Инденторы для измерения твердости:

а — шарик; *б* — конус; *в* — пирамида

При определении твердости по Бринеллю шарик в течение установленного времени вдавливается с определенной силой в испытуемый образец. В результате на его поверхности образуется отпечаток в виде части сферы диаметром d и глубиной h . Число твердости НВ (Па или кгс/мм²) рассчитывается как отношение приложенной нагрузки к площади отпечатка. При помощи специальной лупы замеряется диаметр отпечатка. Число твердости по Бринеллю

$$\text{НВ} = \frac{0,204 P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где P — приложенная нагрузка, Н (кгс); D — диаметр шарика, мм.

Диаметр шарика и нагрузка выбираются в зависимости от механических свойств испытуемого материала и толщины образца. Число твердости по Бринеллю может определяться и по специальных таблицам.

Определение твердости по методу Роквелла является самым распространенным видом технологического контроля материала металлических деталей. По сравнению с методом Бринелля у него следующие преимущества: простота определения числа твердости путем отсчета по шкале индикатора без вычисления или пользования таблицами; малая повреждаемость поверхности; высокая производительность при измерениях. К недостаткам метода можно отнести отсутствие единой шкалы и произвольность ее выбора.

Твердость по Роквеллу HR, выражаемую в условных единицах, вычисляют как линейную функцию разности глубин, на которые вдавливаются конический индентор (рис. 1.72, б) под действием двух последовательно прикладываемых нагрузок — предварительной P_0 и общей P , которая равна сумме предварительной и основной P_1 нагрузок:

$$\text{HR} = A - \frac{h - h_0}{C},$$

где A — некоторая постоянная, которая выбирается в зависимости от применяемой шкалы, для шкал А и С принимают $A = 100$ или 200, а для шкалы В $A = 130$ мкм; h — глубина вдавливания при действии общей нагрузки, измеренная после снятия основной; h_0 — глубина

вдавливания при действии предварительной нагрузки; Ц — цена деления шкалы измерительного устройства в условных единицах твердости ($Ц = 0,002 \text{ мм}$).

Нагрузки при измерении по методу Роквелла строго регламентированы: предварительная — 98 Н (10 кгс), общие — 589,981 Н (60 кгс) и 1471 Н (150 кгс).

Для определения твердости относительно мягких материалов по Роквеллу вместо алмазного конуса используется стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм. Чаще всего на практике применяется шкала С. Шкала А применяется для очень твердых материалов, например твердых сплавов, а шкала В — при использовании сферического индентора. Число твердости по Роквеллу обозначается через HR с добавлением обозначения соответствующей шкалы: HRA, HRB, HRC.

Измерение твердости по Виккерсу рекомендуется для черных и цветных металлов и сплавов (в том числе в тонких подповерхностных слоях и покрытиях). Метод Виккерса особенно удобен для контроля материала деталей, имеющих сложную форму.

Твердость по Виккерсу HV определяется аналогично твердости Бринелля. Различие заключается лишь в твердости и форме индентора. Для определения площади отпечатка при помощи микроскопа измеряется его диагональ d после вдавливания в образец четырехгранной алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями, равным 136° . При указанном угле пирамиды число твердости по Виккерсу вычисляется по формуле

$$HV = \frac{0,189P}{d^2}.$$

Твердость по Виккерсу HV выражается числом твердости (Па или кгс/мм²), полученным действием силы на площадь поверхности пирамидального отпечатка. Для упрощения определения числа твердости по Виккерсу пользуются таблицами, приведенными в ГОСТ 2999–75.

В исследованиях очень часто используется измерение микротвердости HD вдавливанием алмазной пирамиды. Метод используется для контроля тонких подповерхностных слоев и отдельных структурных составляющих и фаз сплавов. ГОСТ 9450–76 устанавливает два метода испытаний: по восстановленному отпечатку

(основной метод); по невозстановленному отпечатку (дополнительный метод).

Испытания по каждому методу могут производиться с помощью алмазного наконечника в виде четырехгранной пирамиды с квадратным или ромбическим основанием, трехгранной пирамиды с основанием в виде равностороннего треугольника или бицилиндрического наконечника. Наиболее часто используется наконечник в виде четырехгранной пирамиды с квадратным основанием. Для испытаний на микротвердость материалов с $HD > 10\,000$ МПа рекомендуется применять алмазный наконечник с рабочей частью в виде трехгранной пирамиды с основанием в форме равностороннего треугольника. Наконечники других видов используются для испытаний материалов при малой толщине испытуемого слоя (фольга, покрытия, пленки, косые шлифы подповерхностных слоев образцов и т.п.).

Испытание по методу восстановленного отпечатка заключается в нанесении на поверхность изделия (образца) отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени (не менее 3 с). После удаления нагрузки и измерения размеров полученного отпечатка число микротвердости определяется по формулам или таблицам ГОСТ 9450–76. Число микротвердости определяют делением приложенной к наконечнику нагрузки в ньютонах (килограмм-силах) на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка в квадратных миллиметрах. При инденторе в виде четырехгранной пирамиды (рис. 1.72, в) с квадратным основанием измеряют диагональ отпечатка, трехгранной пирамиды — глубину треугольного отпечатка и по таблицам в зависимости от приложенной нагрузки находят числа микротвердости. В записи результата измерения микротвердости методом восстановленного отпечатка указывают форму наконечника и значение нагрузки в ньютонах. Например, $HD_{0.490} = 2200$ (число микротвердости 2200 МПа, полученное при вдавливании индентора в виде четырехгранной пирамиды с квадратным основанием при нагрузке 0.490 Н). Если значение нагрузки оговорено раньше, допускается в записи значения микротвердости ее не приводить (например, $HD = 2200$).

Определение микротвердости вдавливанием по методу невозстановленного отпечатка заключается в нанесении на поверхность

изделия (образца) отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени (не менее 3 с), и измерении глубины отпечатка в конце цикла. Число микротвердости так же, как и в предыдущем методе, определяют делением приложенной к наконечнику нагрузки на площадь полученного отпечатка. Для этого используют формулы и таблицы, приведенные в ГОСТ 9450–76. С помощью этих таблиц можно перейти от глубины отпечатка к его параметру (см. выше) и с помощью других таблиц, также приведенных в этом ГОСТе, найти число микротвердости.

Испытания по методу невосстановленного отпечатка следует проводить, когда требуется определить дополнительные характеристики свойств материала (упругого восстановления, релаксации, ползучести) при нормальной температуре.

При определении микротвердости нагрузка имеет одно из следующих значений: 0,049 Н; 0,098; 0,196; 0,490; 0,981; 1,962; 4,905 Н (гири массой 5 г; 10; 20; 50; 100; 200; 500 г). При выборе значения нагрузки исходят из предполагаемой глубины отпечатка. Минимальная толщина изделия (образца) или слоя должна превышать глубину отпечатка не менее чем в 10 раз. Точность результатов увеличивается с ростом нагрузки (при соблюдении указанного требования). Разность размеров одного отпечатка не должна превышать 3 % от меньшего значения. Расстояние от центра отпечатка до края изделия (образца) — не менее двойного размера отпечатка, расстояние между центрами отпечатков, нанесенных на одну поверхность, должно превышать размер отпечатка более чем в 3 раза.

Для измерения микротвердости вдавливанием алмазных наконечников применяют специальные приборы (ГОСТ 10717–75). Определение размеров отпечатков выполняется на микроскопе в светлом поле (погрешность отсчета составляет $\pm 0,5$ цены наименьшего деления шкалы при увеличении в 30–40 раз).

Для измерения микротвердости вдавливанием алмазной пирамиды применяют приборы типа ПМТ-5, ПМТ-6 и др.

Прибор ПМТ-5 обеспечивает автоматическое нагружение, запрограммированную выдержку под нагрузкой и автоматическое разгружение.

Модернизированный прибор ПМТ-6 позволяет проводить определение твердости методами царапания и вдавливания в широком

диапазоне нагрузок (от 0,03 до 2 Н) алмазной пирамиды (с двухгранным углом при вершине 136°) с квадратным основанием, пирамиды Кнупа с основанием в виде вытянутого ромба, трехгранной пирамиды Берковича, конуса с углом заострения 90° (по Мартенсу) и бицилиндрического наконечника. Предусмотрены возможности измерения тангенциальной силы сопротивления царапанию, реверсивное движение образца по отношению к царапающему наконечнику, вращение координатного столика и анализ царапин в отраженном, проходящем и поляризованном свете.

Прибор УПМ-1 обеспечивает непрерывную регистрацию движения индентора в испытываемом материале под действием приложенной нагрузки. Результаты испытания получаются в виде двухкоординатной диаграммы нагрузка — глубина внедрения на самопишущем потенциометре.

Числа микротвердости обычно превышают числа твердости тем в большей степени, чем тверже материал. Это связано с возрастанием погрешностей измерений, наклепом подповерхностного слоя при подготовке шлифов для измерений и другими факторами. В силу разнообразия факторов, влияющих на данный процесс, универсальная зависимость для различных материалов между макро- и микротвердостью пока не установлена. Однако можно приблизительно считать, что для сталей при нагрузке 0,5...1 Н зависимость между твердостью HV и микротвердостью HD принимает вид $HV = (0,7...0,8)HD$.

Испытания на износостойкость занимают важное место в работе исследователей свойств материалов и деталей. Эти испытания могут производиться по разным схемам.

Одной из основных причин изнашивания деталей машин и режущих инструментов является усталость материала в подповерхностных слоях при упругом деформировании и охрупчивание при повторном пластическом деформировании. При наличии в структуре трущихся материалов твердых частиц (например, карбидов железа, хрома и т.д.) возможно микрорезание этими частицами, т.е. абразивное изнашивание. Оно может иметь место также при наличии абразивных частиц в промежуточном слое. При значительной удельной нагрузке и относительной малой скорости резания часто наблюдается адгезионное изнашивание. При достаточно высокой температуре в зоне трения развивается изнашивание, связанное с диффузией атомов одного из тел в другое. При этом могут изме-

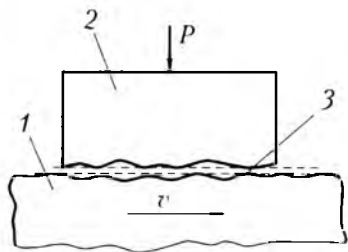


Рис. 1.73. Схема испытания на износостойкость при жидкостном истирании

няться химический состав и структура, а следовательно, и механические свойства подповерхностных слоев, что способствует увеличению скорости других видов изнашивания. В некоторых случаях изнашивание может быть связано с окислением материала трущихся тел, эрозией и т.д. На интенсивность изнашивания оказывает влияние микрогеометрия поверхностей, их несущая способность и маслоспособность.

На рис. 1.73 показана простейшая схема испытания на износостойкость образца 2, перемещающегося в поджатом силой P состоянии со скоростью v по плите 1, на которую может быть нанесен смазочный материал 3.

На рис. 1.74 представлены различные схемы испытаний на износостойкость методом моделирования, которые проводятся на различных лабораторных установках. Испытуемый образец 1 с задан-

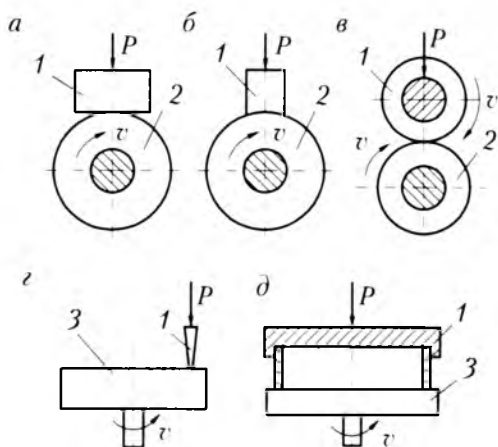


Рис. 1.74. Схемы испытаний на износостойкость методом моделирования

ной силой P поджимается к периферии ролика 2 или торцу диска 3. Приведенные схемы испытаний обеспечивают разный коэффициент относительного перекрытия (отношение площадей трения контактирующей пары): от близкого к нулю до 1 (рис. 1.74, $a-d$).

Для оценки в лаборатории износостойкости пары трения применительно к заданным эксплуатационным условиям необходимо: 1) обеспечить коэффициент относительного перекрытия, который имеет место при эксплуатации; 2) обеспечить скорость v скольжения, максимально приближающуюся к эксплуатационной; 3) подобрать такую нагрузку, при которой контактная температура будет соответствовать эксплуатационной; 4) определить фактическую площадь касания; 5) вычислить удельный износ. Удельный износ будет совпадать с эксплуатационным при одинаковых параметрах микрогеометрии поверхностей в реальном узле и у испытуемых образцов.

Для определения износа материала и его распределения по поверхности трения применяют различные методы. Наиболее распространенным является метод измерения линейного (размерного) износа, для чего измеряют размеры элементов пары трения до и после испытания.

Часто применяется также массовый метод измерения износа, при котором образцы взвешиваются до и после испытания. Однако этот метод не дает возможности определить закон распределения износа по поверхности трения. В случае неравномерного износа образцов его измерение удобно проводить при помощи профилографа.

Для измерения износа элементов пар трения в действующей машине хорошо себя зарекомендовал метод искусственных баз. В основе этого метода лежит косвенное определение износа по изменению размеров суживающегося углубления заранее известного профиля (рис. 1.75). Такое углубление можно получить вдавливанием конического или пирамидального индентора, вырезанием остроугольной лунки вращающимся резцом или шлифовальным кругом.

Линейный износ Δl определяется по следующим формулам. Если размер диагонали пирамидальной лунки изменился от d_1 до d_2 , то

$$\Delta l = \frac{d_1 - d_2}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}.$$

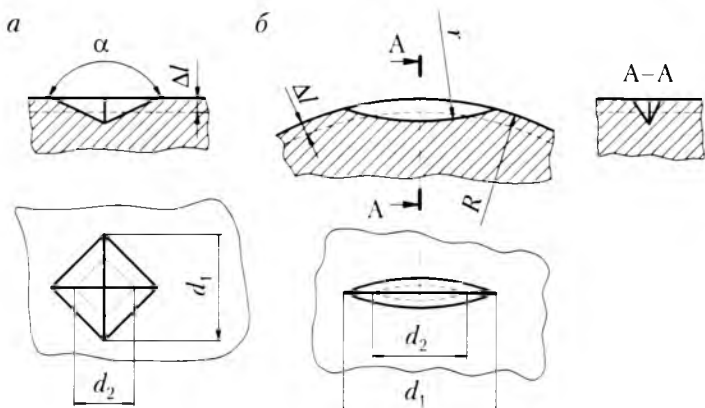


Рис. 1.75. Разновидности искусственных баз для измерения износа

Если длина лунки радиуса r в результате изнашивания наружной цилиндрической поверхности изменилась от d_1 до d_2 , то

$$\Delta l = 0,125(d_1^2 - d_2^2) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right).$$

а в случае измерения износа внутренней цилиндрической поверхности

$$\Delta l = 0,125(d_1^2 - d_2^2) \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right).$$

Для плоской поверхности

$$\Delta l = 0,125 \frac{d_1^2 - d_2^2}{r}.$$

Объем продуктов изнашивания можно также определить путем химического анализа смазочного материала. Этот метод обладает высокой точностью, но не дает возможности оценить износ каждой из трущихся деталей пары трения. Если в материал детали, износ которой требуется определить, внести радиоактивные изотопы, то по мере изнашивания в слой смазочного материала будет попадать пропорциональное износу количество атомов этого изотопа. По интенсивности излучения изотопа в пробе масла можно судить об объемном износе за определенное время. Изотопы чаще

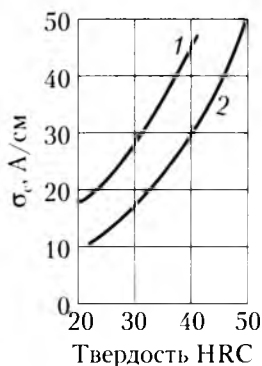


Рис. 1.76. Кривые зависимости между коэрцитивной силой σ_c и твердостью HRC:
1 — сталь 30ХВ; 2 — сталь 20Х17Н2

всего образуются в подповерхностном слое материала испытываемой детали облучением ее потоком нейтронов.

Неразрушающие методы определения механических свойств и структуры конструкционных материалов основаны на корреляционной зависимости между структурой и механическими свойствами материалов, с одной стороны, и их магнитными и акустическими характеристиками — с другой. Такова, например, связь между твердостью углеродистых и низколегированных сталей и их коэрцитивной силой σ_c . Чем больше содержание углерода в сплаве, тем выше коэрцитивная сила. Но в различных структурных составляющих углерод в разной степени способствует увеличению коэрцитивной силы сплава: в меньшей степени, когда он находится в форме графита, сильнее — в перлите и мартенсите и наиболее сильно — в цементите. Зависимость между коэрцитивной силой и твердостью сталей 30Х13 и 20Х17Н2 показана на рис. 1.76, а зависимость коэрцитивной силы и твердости стали ШХ15 от температуры отпуска — на рис. 1.77 [21].

При перемагничивании ферромагнитных тел магнитная индукция B зависит не только от напряженности магнитного поля σ , но и от предшествующего магнитного состояния. Вид кривой цикла перемагничивания, называемой петлей гистерезиса, показан на рис. 1.78, где отрезок Od характеризует остаточный магнетизм, т.е. магнитную индукцию при $\sigma = 0$, отрезок Oe — коэрцитивную силу σ_c , т.е. напряженность магнитного поля, необходимую для полного размагничивания.

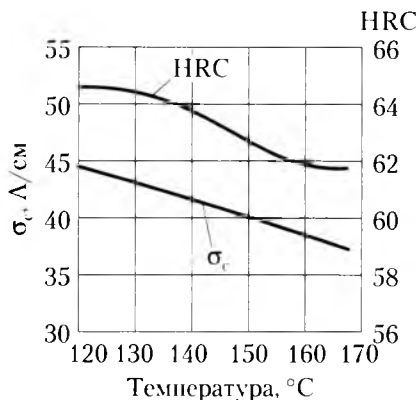


Рис. 1.77. Кривые зависимости коэрцитивной силы σ_c и твердости HRC от температуры стали ШХ15

Блок-схема коэрцитиметра показана на рис. 1.79. Участок контролируемого объекта 1 намагничивается при помощи электромагнита 2 и катушек 8. Перемычкой электромагнита служит сердечник 7 феррозонда с питающей 5 и измерительными 4 катушками. Катушки 8 получают питание от силового трансформатора 11 через стабилизирующие выпрямители намагничивания 10 и размагничивания 12 и затем через коммутатор 14. Индикаторы 9 и 13 показывают соответственно ток намагничивания и размагничивания. Катушка 5 получает питание через блок 6, а напряжение на выходе измерительной катушки измеряется прибором 3.

После намагничивания при помощи коммутатора отключается ток намагничивания и плавно увеличивается ток размагничивания до тех пор, пока прибор 3 не покажет отсутствие магнитного потока на контролируемом участке. Показания индикатора 13 в этот

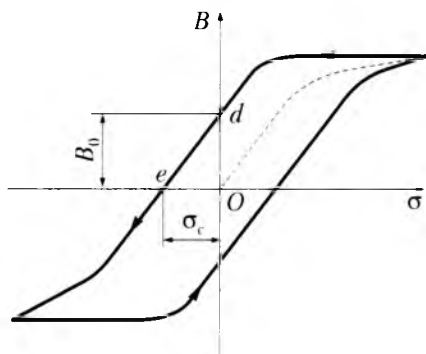


Рис. 1.78. Кривая перемагничивания

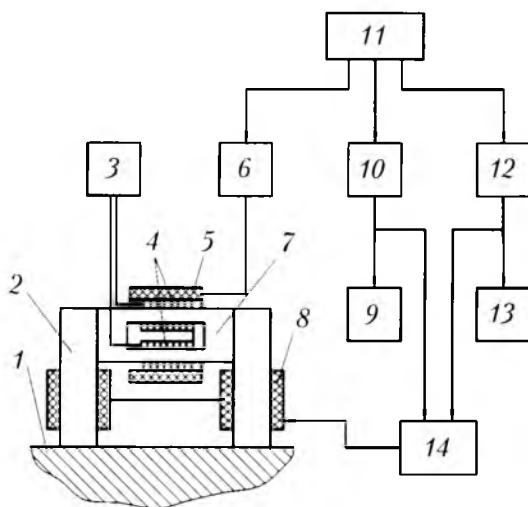


Рис. 1.79. Блок-схема коэрцитиметра

момент пропорциональны измеряемой коэрцитивной силе. Прибор обеспечивает точность измерения $\pm 3\%$.

В других приборах измеряется не коэрцитивная сила, а пропорциональная ей остаточная индукция B (см. рис. 1.78) или магнитная проницаемость, равная, согласно определению, отношению B/σ . Индукционный метод измерения магнитной (динамической) проницаемости основан на том, что если поддерживать постоянной амплитуду напряженности намагничивающего поля, то амплитудная и динамическая проницаемость будет пропорциональна амплитуде индукции в контролируемой детали. Обычно используют дифференциальную схему, с помощью которой определяют изменение магнитной проницаемости контролируемой детали по сравнению с эталонной. Погрешность измерения прибором ЭМТ-2, построенным на данном принципе, не превышает 1 HRC для сталей 50ХФА и 30ХГСА [21].

Электромагнитный метод (метод вихревых токов) основан на регистрации изменений электромагнитного поля вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Его можно изменять для измерения параметров механических свойств материала, если существует корреляционная зависимость между ними и удельным электрическим сопротивлением

или магнитной проницаемостью испытуемого материала. Экспериментально установлено, что удельная электрическая проницаемость стали тем меньше, чем выше в ней содержание углерода и чем больше углерода при закалке перейдет в твердый раствор. Выявлена связь между удельной проводимостью алюминиевых сплавов γ и свойствами их после термической обработки. Так, например, если в состоянии поставки алюминиевый сплав АК6 имеет в среднем $\gamma = 27,4$ МСм/м, то при нормальной закалке $\gamma = 22,1$ МСм/м. Если при закалке материал перегрет, то $\gamma = 21,1$ МСм/м. В зависимости от времени старения значение γ изменяется в пределах от 20 до 24 МСм/м, сначала уменьшаясь, а затем увеличиваясь.

Электромагнитными структуроскопами измеряют мгновенное значение несинусоидального напряжения измерительного вихревого преобразователя (ВТП) или амплитуду и фазу одной из гармоник при перемагничивании в высокочастотных полях малой напряженности, в низкочастотных полях большой напряженности, либо в двух- и многочастотных полях. Это позволяет контролировать вариации химического состава, структуру металлов и сплавов, а также механические напряжения в них. С помощью электромагнитных приборов с ВТП можно контролировать качество термической и химико-термической обработки, состояние подповерхностных слоев деталей после механической обработки (шлифование, ППД, наклеп), обнаруживать усталостные трещины на ранних стадиях развития, наличие α -фазы и т.п. Таким образом, измеренный электромагнитным структуроскопом сигнал несет информацию о многих параметрах, что является, с одной стороны, преимуществом, а с другой — недостатком, так как требуются специальные приемы разделения информации об отдельных параметрах объекта.

По виду преобразования параметров объекта выходные значения ВТП делят на трансформаторные и параметрические. В трансформаторных ВТП, имеющих минимум две обмотки (возбуждающую и измерительную), параметры объекта преобразуются в напряжение измерительной обмотки, а в параметрических, имеющих, как правило, одну обмотку, — в комплексное сопротивление. Схемы некоторых таких преобразователей показаны на рис. 1.80.

Акустические методы контроля физико-механических свойств материалов (размеров зерна, модулей упругости, твердости, текстуры, прочности и т.п.) основаны на связи этих свойств со скоростью

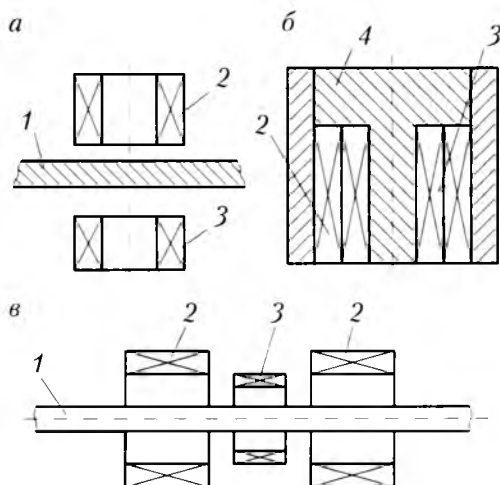


Рис. 1.80. Схемы вихревых измерительных преобразователей:

а — накладного; б — накладного экранного; в — проходного вихретокового; 1 — испытуемый образец; 2 — возбуждающая обмотка; 3 — измерительная обмотка; 4 — сердечник

распространения и коэффициентом затухания звуковых волн в испытуемом материале.

Одним из важнейших показателей качества кристаллических материалов, в частности металлов, является размер зерна, определяющий прочностные характеристики изделия. В первом приближении зависимость между номером N шкалы (баллы) и размерной характеристикой зерна $\bar{D}$ (мкм) можно аппроксимировать уравнением

$$\bar{D} = 352 \exp(-0,35N).$$

Наибольшее влияние размера зерна на коэффициент затухания ультразвука наблюдается при $5 \leq \lambda/\bar{D} \leq 15$ (здесь λ — длина ультразвуковых волн). Для измерения затухания наибольшее применение получил импульсный метод, основанный на сравнении амплитуд двух или нескольких ультразвуковых сигналов разной частоты. При этом опорную частоту выбирают низкой, так что затухание ультразвуковых волн при ней практически не зависит от структуры материала. Рабочие частоты соответствуют приведенному выше неравенству. При рабочей частоте 0,65...10 МГц

можно оценить размер зерна от 1 до 7 баллов. Для измерения размера зерна можно применять серийные импульсные дефектоскопы (ДСК-1, УС-11И, УС-10П и др.).

Измеряя скорость распространения ультразвуковых волн в материале, можно определить его модуль упругости и другие упругие постоянные. Кроме того, по относительному изменению скорости различных ультразвуковых волн можно определить напряженное состояние материала. На экспериментальной установке УЗМД [21] контролируют остаточные подповерхностные напряжения в стальных или чугунных отливках с точностью $\pm 0,2$ МПа.

Предел прочности стеклопластиков можно определить по формуле

$$\sigma_B = E[A + B/\alpha c],$$

где E — модуль упругости стеклопластика, который определяют по полученным значениям c и плотности материала; A и B — коэффициенты; α — коэффициент затухания; c — скорость распространения ультразвуковых волн в материале.

Излучающий 2 и приемный 1 искатели устанавливают на очищенную и смазанную маслом поверхность стеклопластика 3 (рис. 1.81). Расстояние между искателями l_0 обычно составляет 200 мм. Скорость распространения звука определяют по времени t его прохождения в материале: $c = l_0/t$. Для измерения коэффициента затухания один из искателей устанавливается на расстоянии $l_1 = l_0/2$. По изменению амплитуды сигнала находят значение α .

Для измерения твердости абразивного инструмента используют корреляционную связь ее со скоростью распространения ультразвуковых волн в материале, которую определяют резонансным методом при помощи прибора «Звук-1М» (рис. 1.82). Генератор 1 создает электрические колебания, частота которых изменяется

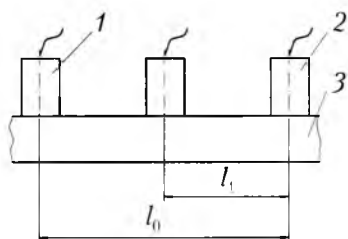


Рис. 1.81. Схема измерения механических свойств материалов акустическим методом

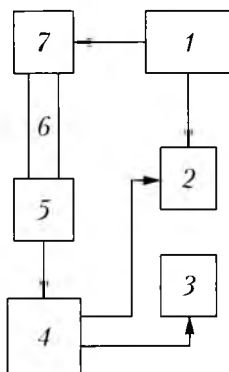


Рис. 1.82. Блок-схема прибора «Звук-1М»

от 5 до 550 кГц. При помощи пьезоэлектрического излучателя 7 эти колебания преобразуются в механические, передаются образцу 6 и воспринимаются пьезоэлектрическим приемником 5, который осуществляет обратное преобразование. Электрические колебания с приемника проходят через усилитель 4 и поступают на амплитудный 3 и фазовый 2 индикаторы резонанса. Одновременно на фазовый индикатор подается опорное напряжение с генератора. При совпадении частоты генератора с частотой собственных колебаний образца наступает резонанс, который фиксируется в момент раскрытия сектора глазка амплитудного индикатора или (более

точно) по минимальным показаниям стрелочного прибора фазового индикатора. Градуировочные таблицы позволяют оценивать твердость абразивного инструмента по замеренной резонансной частоте в зависимости от размеров инструмента.

Остаточные напряжения можно классифицировать по протяженности силового поля: 1) макронапряжения, или напряжения 1-го рода, охватывающие области, соизмеримые с размерами испытуемого объекта; они имеют ориентацию, зависящую от формы объекта; 2) микронапряжения, или напряжения 2-го рода, распространяющиеся на отдельные зерна металла или на группу зерен; 3) субмикроскопические напряжения, относящиеся к искажениям атомной решетки кристалла; ориентация их связана со структурой атомной решетки.

Остаточные макронапряжения σ возникают в результате действия различных технологических факторов при изготовлении детали (изделия). Значение и знак остаточных макронапряжений зависят от схемы деформирования объекта и температуры, при которой оно происходило. При обработке резанием или шлифованием остаточные макронапряжения являются следствием неравномерности распределения температуры и деформаций в подповерхностных слоях толщиной y материала обрабатываемой заготовки детали и во времени. На рис. 1.83 кривые 2 и 1 соответствуют операциям шлифования и точения, кривая 4 — сочетанию шлифования

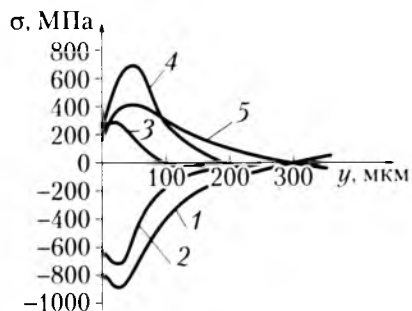


Рис. 1.83. Эпюры распределения напряжений по глубине y подповерхностного слоя заготовок после обработки их различными методами

с алмазным выглаживанием стали ЭИ643, 5 и 3 — шлифованию и фрезерованию сплава ХН70ВМТЮ. Состав и способ подвода СОЖ значительно влияют на значение и знак макронапряжений после обработки резанием и ППД.

Значительные макронапряжения возникают при термической обработке (закалке), при сварке и резке. В этих случаях остаточные макронапряжения обусловлены в основном неравномерностью температурного поля при быстром нагреве или охлаждении. На рис. 1.84 показана эпюра напряжений в сплошном образце из стали 40ХНМ при закалке в воде (1) и масле (2) [21].

Микронапряжения являются следствием различия физических свойств компонентов поликристаллического тела, стесненных условий деформирования отдельных зерен, а также анизотропии их свойств. Особенно значительны микронапряжения при фазовых превращениях (кристаллизация и распад твердого раствора), так как при этом увеличение или уменьшение объема отдельных зерен сопровождается появлением значительных межзеренных напряжений.

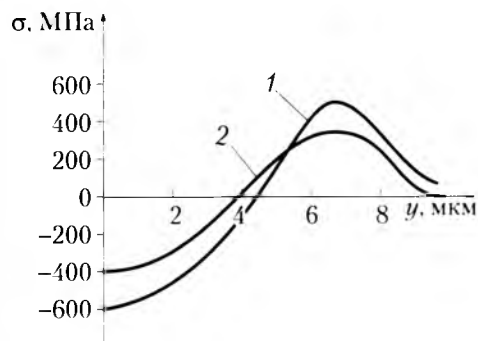


Рис. 1.84. Эпюры напряжений после закалки

Вследствие различия коэффициентов линейного расширения компонентов сплава при его нагреве также возникают значительные микронапряжения.

Возникшие в материале остаточные микро- и макронапряжения не остаются постоянными, а изменяются с течением времени. Релаксация (ослабление) макронапряжений сопровождается обычно общей деформацией детали, иногда настолько значительной, что она наблюдается визуально или вызывает разрушение (появление трещины). При низких температурах этот процесс идет медленно. Нагрев до температуры отпуска и выше способствует ускорению релаксации макронапряжений.

Основными методами определения остаточных напряжений являются механические и рентгеновские. Применяются также электрофизические методы, при которых остаточные напряжения находятся по изменению электромагнитных свойств подповерхностного слоя материала детали.

Механические методы основаны на предположении, что разрезка или удаление части материала заготовки с остаточными напряжениями эквивалентны приложению к оставшейся заготовке на вновь появившихся поверхностях напряжений, равных остаточным, но с обратным знаком. Они вызывают деформирование детали или появление сил в устройствах, препятствующих деформации. Измеряя возникшие деформации или силы, можно вычислить остаточные напряжения.

Различия механических методов заключаются: а) в форме образцов; б) в предположениях относительно закона распределения остаточных напряжений; в) в способе измерения деформаций образца или реакций опор, способных устранить эти деформации.

Наиболее широкое применение для вырезки образцов нашли методы электроэрозионной прошивки. Для деталей из жаропрочных и титановых сплавов весьма перспективны методы электрохимической прошивки. Они производительны и не вызывают дополнительных остаточных напряжений. После механической вырезки образцов рекомендуется стравливать с вновь образованных поверхностей слой толщиной до 0,2 мм для удаления напряжений, возникающих при вырезке.

Наиболее распространенными методами удаления напряженных слоев металла при исследовании остаточных напряжений являются

электролитическое и химическое травления. Рекомендуемые составы травителей и электролитов для различных материалов приведены в табл. 1.46.

Таблица 1.46

Растворы для травления

Материал образца	Состав электролита или травителя (в массовых долях)	Метод травления
Углеродистые и низколегированные стали	18...20 % серной кислоты, остальное — вода; 20 % азотной кислоты, остальное — вода	Электрохимический
Высоколегированные стали	45 % ортофосфорной кислоты, 45 % серной кислоты, остальное — вода; 60...65 % ортофосфорной кислоты, 15...20 % серной кислоты, 0.5 % хромового ангидрида, 7 % глицерина, 0.5 % сернокислого железа, остальное — вода	Электрохимический
	15...20 % азотной кислоты, 20...25 % щелочи натрия, остальное — вода; 30 % азотной кислоты, остальное — вода	Химический
Чугун	35 % бисульфата натрия, остальное — вода; 8...10 % соляной кислоты, остальное — вода	Электрохимический
Сплавы алюминия	10...15 % натриевой щелочи, остальное — вода	Химический
	91 % ортофосфорной кислоты, 9 % хромового ангидрида	Электрохимический
Латуни, бронзы	100 % ортофосфорной кислоты	Электрохимический

Электрохимическое травление при прочих равных условиях предпочтительнее, так как, изменяя плотность тока, можно изменять скорость снятия металла, а также обеспечить ее стабильность, что важно для автоматизации записи кривой деформирования образца. Поверхности образца, не подлежащие травлению, и детали подвески защищаются покрытиями, стойкими при данной температуре. При температурах до 30 °С можно использовать парафин и воск. Лаки ХВЛ-21 и Э1 можно использовать и при более высоких температурах. Травление составами, указанными в табл. 1.46 проводится при температуре 20 °С [21].

Форма вырезаемых образцов показана на рис. 1.85. Напряженное состояние в них считается одноосным. Напряжения изменя-

ются только в зависимости от расстояния h от рассматриваемой точки A до обработанной поверхности C . Образцы в виде стержней прямоугольного сечения (см. рис. 1.85, *a*) широко используются для исследования влияния различных технологических факторов (в частности, методов поверхностной обработки) на распределение остаточных напряжений. Кроме того, прямоугольные призматические образцы вырезаются из цилиндрических деталей для определения нормальных остаточных напряжений в подповерхностном слое материала детали вдоль образующих. При этом рекомендуется соблюдать соотношение

$$3 < B < 0,4\sqrt{HR},$$

где H , B — соответственно высота и ширина образца; R — наружный радиус цилиндрической поверхности.

Однако не рекомендуется принимать ширину B образцов больше 15 мм. Их высота H должна более чем в три раза превосходить максимальную глубину исследуемого подповерхностного слоя. С увеличением высоты образца снижаются погрешности, связанные с внесением дополнительных остаточных напряжений при вырезке. Вместе с тем увеличение высоты образца ограничивается необходимостью получения достаточно больших прогибов при данной длине в процессе травления. Чтобы увеличить допустимую толщину образцов, рекомендуется применять метрологические схемы измерения деформаций с большими коэффициентами усиления K_y (рис. 1.86, 1.87).

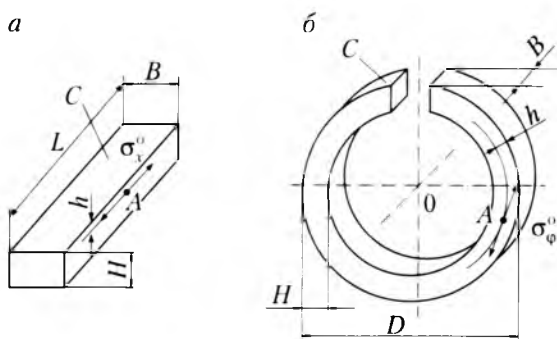


Рис. 1.85. Форма образцов для определения напряжений

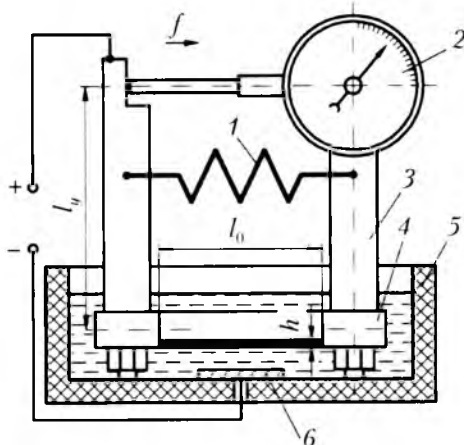


Рис. 1.86. Метрологическая схема определения напряжений в призматическом образце:

1 — пружина для компенсации силы измерения; 2 — индикатор; 3 — стержни усилителя; 4 — образец; 5 — ванна из кислотоупорного материала; 6 — пластина для подачи напряжения

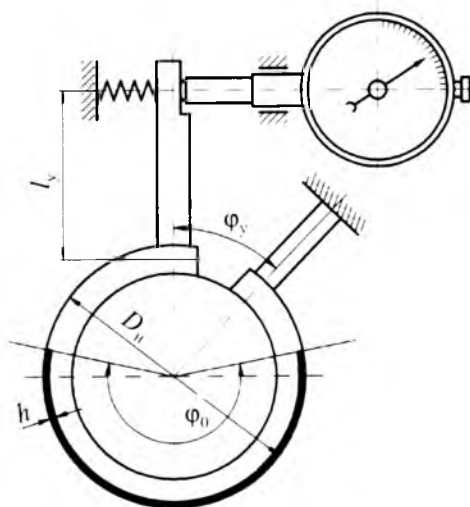


Рис. 1.87. Метрологическая схема определения напряжений в кольцевом образце

Для определения окружных остаточных напряжений в цилиндрических деталях вырезают кольцевые образцы (см. рис. 1.85, б), удовлетворяющие неравенству $H \leq 0,2D$.

Остаточные напряжения σ_{λ}^0 в точке А (см. рис. 1.85, а), отстоящей от поверхности призматического образца на расстоянии h , представляют в виде суммы двух составляющих: $s_{\lambda\text{в}}$, определяемой по деформации образца при вырезке из детали или после снятия отдельно обрабатываемого образца с приспособления, и $s_{\lambda\text{с}}$, вычисляемой по кривой деформации образца при стравливании его на глубину h [21]:

$$\begin{aligned}\sigma_{\lambda}^0 &= \sigma_{\lambda\text{в}} + \sigma_{\lambda\text{с}}, \\ \sigma_{\lambda\text{в}} &= 8E(0,5H - h)f_{\text{в}}/L^2 + E\epsilon_{\lambda\text{в}}; \\ \sigma_{\lambda\text{с}} &= \frac{4F}{3l_0^2 K_y} \left[(H - h)^2 \frac{df}{dh} - 4(H - h)f + 2 \int_0^h f(h)dh \right],\end{aligned}$$

где E — модуль упругости; l_0 — длина участка, подлежащего травлению; K_y — коэффициент усиления метрологической схемы; $f_{\text{в}}$ — деформация при вырезке; $\epsilon_{\lambda\text{в}}$ — среднее относительное удлинение образца при вырезке; f — деформация при стравливании.

Для метрологической схемы, указанной на рис. 1.86, $K_y = 8l_y/l_0$.

Остаточные напряжения в кольцевых образцах определяются по формулам

$$\begin{aligned}\sigma_{\varphi}^0 &= \sigma_{\varphi\text{в}} + \sigma_{\varphi\text{с}}; \\ \sigma_{\varphi\text{в}} &= \frac{2Ef_{\text{в}}}{D^2 K_y} (H - h) - E\epsilon_{\varphi\text{в}}; \\ \sigma_{\varphi\text{с}} &= \frac{E}{3K_y} \left[\frac{(H - h)^2}{D_h^2} \frac{df}{dh} - 2 \int_0^h \frac{2H - 3h + \epsilon}{D_{\epsilon}^2} \frac{df}{d\epsilon} d\epsilon \right],\end{aligned}$$

где $f_{\text{в}}$ — деформация, связанная с изгибом кольца при его вырезке (или при снятии разрезанного кольцевого образца с приспособления после его обработки); $D_h(D_{\epsilon})$ — средний диаметр кольцевого образца при удалении слоя толщиной $h(\epsilon)$; f — деформация при стравливании на глубину h .

При $h \leq 0,1H$ с достаточной для практики точностью можно использовать формулу

$$\sigma_{\varphi c} = \frac{E(H-h)}{3D^2 K_y} \left[(H-h) \frac{df}{dh} - 4f \right]$$

Коэффициенты усиления для метрологической схемы, указанной на рис. 1.87:

□ при разрезке образца

$$K_y = (l_y/D + 0,5)(2\pi - \varphi_y) + 0,5 \sin \varphi_y;$$

□ при его травлении

$$K_y = (l_y/D + 0,5)\varphi_0 + \cos(\varphi_y/2) \cdot \sin(\varphi_0/2),$$

где D — средний диаметр кольца; углы φ_y , φ_0 и длина l_y указаны на рис. 1.87.

В формулах для расчета остаточных напряжений производную прогиба по глубине снятого слоя можно вычислить по трем значениям деформации f_{i-1} , f_i и f_{i+1} при рассматриваемом значении h_i и двух близких к нему значениях h_{i-1} и h_{i+1} :

$$\frac{df}{dh} = Af_{i-1} + Bf_i + Cf_{i+1},$$

где

$$A = \frac{h_{i+1} - h}{(h_i - h_{i-1})(h_{i+1} - h_{i-1})};$$

$$B = \frac{2h - h_{i-1} - h_{i+1}}{(h_i - h_{i-1})(h_i - h_{i+1})};$$

$$C = \frac{h - h_{i-1}}{(h_{i+1} - h_{i-1})(h_{i+1} - h_i)}.$$

Информация для вычислений берется по графикам изменения прогибов f в зависимости от h . В качестве примера на рис. 1.88 показаны кривая 1, полученная при травлении образца, вырезанного вокруг отверстия в шестерне из стали 12Х2НВФА, и кривая 2, полученная расчетом эпюры остаточных напряжений σ_{φ}^0 [21].

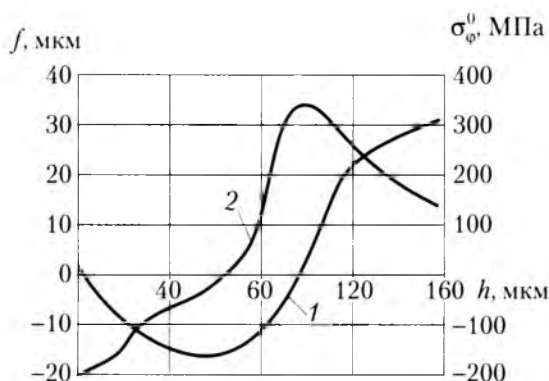


Рис. 1.88. Результаты исследования остаточных напряжений

Наличие остаточных напряжений в поликристаллических телах, каковыми являются металлы, обуславливает различные интерференционные эффекты рентгеновских лучей, отраженных от поверхности образцов, в зависимости от размеров зоны, в которой эти напряжения уравниваются. Макронапряжения имеют постоянную ориентацию на исследуемом участке поверхности, и вследствие этого изменяются межатомные расстояния, что вызывает угловое отклонение лучей, отраженных от поверхности (от определенных кристаллографических плоскостей в подповерхностном слое). В результате появляется смещение линий на рентгенограммах, по которому и вычисляются остаточные напряжения 1-го рода. В отражении участвуют только определенным образом ориентированные кристаллы подповерхностного слоя толщиной от 3 до 50 мкм. Полученное при этом смещение пропорционально усредненному значению остаточных напряжений, распределенных по определенному закону в этом слое.

Микронапряжения, уравнивающиеся в объемах отдельных кристаллов и блоков, нельзя определить механическими методами. Но они легко определяются по уширению интерференционных линий на рентгенограмме.

Описанные ранее электромагнитные методы контроля структуры можно применять и для измерения остаточных напряжений. Но точность этих методов пока относительно низкая и для определения эпюры остаточных напряжений, так же как и при механиче-

ских методах, требуется последовательное сравливание слоев металла.

Важную роль в экспериментах играют исследования: структуры материала при разных методах обработки, упрочняющей и химической обработки, покрытий и т.д. В § 1.7 приведены примеры улучшения качества и свойств деталей машин и приборов технологическими методами.

1.6. Противоречия, информационный и эвристический поиски решений



1.6.1. Технические и физические противоречия

Техническим решением компонента устройства будем называть описание его конфигурации, особенностей исполнения его элементов, их относительного расположения и взаимосвязей, геометрической формы элементов и их материала. В некоторых случаях добавляется информация о соотношениях между показателями (размерами, параметрами качества, числом элементов, массой и т.д.). Каждое техническое решение предназначено для выполнения одной или нескольких определенных функций.

Техническим решением компонента технологического процесса будем называть описание технологической операции (перехода), которое содержит информацию: о состоянии объекта производства после выполнения операции, о применяемом технологическом оборудовании, приспособлениях и инструментах, о режимах обработки. Главной функцией технологической операции (перехода) является изменение состояния объекта производства.

Техническое решение считается *допустимым*, если оно удовлетворяет определенному списку требований (ограничений), который сформирован на этапе постановки и уточнения задачи.

Под методом поиска технических решений понимается совокупность приемов мыслительной деятельности и операций по сбору, обработке и хранению информации. При этом необходимо найти как можно больше решений:

- для реализации полезных функций технической системы;
- устранения или ослабления отрицательного эффекта ненужных и излишних функций;

□ эффективного синтеза новых или усовершенствованных технических систем, когда в этом появится потребность.

Чем больше функционально взаимозаменяемых вариантов удастся получить, тем больше возможность реализовать действительно эффективные решения и, следовательно, приблизиться к минимальным, функционально оправданным затратам на реализацию и эксплуатацию проектируемой системы.

Предположим, задана некоторая главная полезная функция (ГПФ). Тогда обычно возникает одна из следующих ситуаций: 1) у заказчика имеется действующая техническая система, которая в изменившихся условиях неудовлетворительно выполняет заданную функцию; 2) у заказчика нет технической системы, необходимой для выполнения заданной функции, но известны описания систем, выполняющих ее; 3) неизвестны описания технических систем, выполняющих заданную функцию.

В первой ситуации необходимо составить список недостатков действующей системы (ее компонентов), и тогда проблема будет состоять в поиске такого технического решения, которое улучшит действующую техническую систему за счет устранения указанных недостатков. Во второй — необходимо из имеющегося массива описаний технических систем выбрать несколько систем (прототипов), удовлетворяющих качественной формулировке заданной функции. Если при этом будет найдена техническая система, удовлетворяющая и количественной формулировке, то можно считать, что техническое решение найдено. Если такой прототип не будет найден, то после составления списка недостатков наиболее подходящего из отобранных прототипов проблема будет соответствовать первой ситуации. В третьей ситуации проблема будет состоять в том, что необходимо синтезировать техническую систему «с нуля». При этом должен быть задан полный список необходимых функций.

Метод, который лучше всего использовать для поиска технического решения, зависит от вида задачи (т.е. от причины, порождающей недостаток). Рассмотрим две основные: функциональную неполноту и техническое (физическое) противоречие. Первая означает, что система не может выполнять одну или несколько функций из-за того, что не имеет соответствующих компонентов и (или) связей. Вторая освещена ниже.

Поиск технических решений может быть информационным и эвристическим.

Техническое противоречие возникает в тех случаях, когда некоторое улучшение одних показателей качества системы (появление положительного эффекта — ПЭ) приводит к ухудшению других (появление нежелательного эффекта — НЭ). Оно возникает почти всегда при попытках как-то улучшить систему, но существенно обостряется, когда НЭ приближается к допустимой границе или превышает ее. Например, при попытке увеличить скорость, производительность или степень автоматизации ухудшается точность, удобство эксплуатации и увеличиваются затраты на изготовление технической системы.

Причиной технического противоречия часто является физическое противоречие. **Физическое противоречие** — это взаимоисключающие требования, предъявляемые к компоненту системы, которые состоят в том, что один из характеризующих этот компонент показателей должен иметь два различных значения. Компонент, к которому предъявляются противоречивые требования, будем называть **узловым компонентом**, а характеризующий его показатель — **узловым показателем** (P_u). Физические противоречия присущи только работоспособным системам.

Например, любой универсальный металлорежущий станок характеризуется такими показателями, как максимальный размер обрабатываемой заготовки L_m и стоимость C . Первый из этих показателей является положительным, а второй — отрицательным, причем оба они прямо пропорциональны характерному размеру рабочей зоны станка L_c . Физическое противоречие в данном случае можно сформулировать следующим образом: «характерный размер рабочей зоны станка должен быть как можно больше, что позволит увеличить максимальный размер обрабатываемой заготовки, характерный размер рабочей зоны должен быть как можно меньше, что позволит уменьшить его стоимость». Из данного примера следует, что физическое противоречие возникает в том случае, если узловой показатель оказывает влияние по крайней мере на два критерия предпочтения (показателя качества P_x) системы. При этом возможны следующие соотношения: 1) оба показателя качества положительны; 2) оба показателя качества отрицательны; 3) один показатель качества положителен, а второй показатель

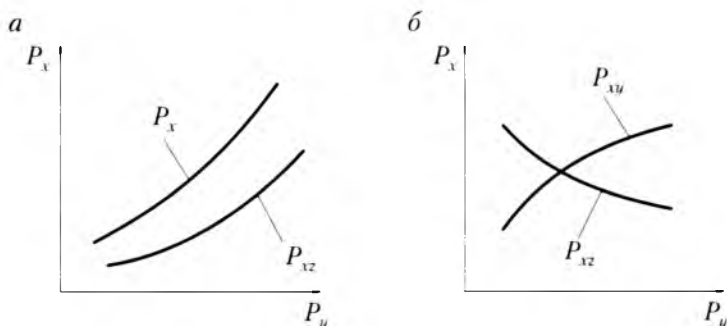


Рис. 1.89. Варианты зависимости количественных показателей качества P_x от узлового P_y

качества отрицателен; 4) оба показателя качества увеличиваются (уменьшаются) при увеличении узлового показателя (рис. 1.89, а); 5) один показатель качества увеличивается, а другой показатель уменьшается при увеличении узлового показателя (рис. 1.89, б).

Физическое противоречие имеет место, когда:

- оба показателя качества имеют одинаковый знак, а характер влияния узлового показателя на каждый из них различен;
- показатели качества имеют разные знаки, а характер влияния узлового показателя на них одинаков.

Критерии предпочтения могут быть качественными и показывать на наличие (критерий приравнивается к 1) или отсутствие (критерий приравнивается к 0) какого либо свойства, компонента или функции. Они также могут быть положительными и их следует обеспечить, добиться, создать и т.д. или отрицательными, которых нужно избежать, от которых отказаться, без которых обойтись. По характеру зависимости от величины P_y различают два вида качественных показателей: AP_x и BP_x (рис. 1.90). Узловой показатель может оказывать влияние на один количественный и один качественный критерий предпочтения, либо на два качественных.

Физическое противоречие также имеет место, если узловой показатель влияет: 1) на количественный (любого знака) и качественный типа BP_x ; 2) количественный показатель и качественный показатель типа AP_x противоположных знаков; 3) качественные показатели типа AP_x разных знаков; 4) качественные показатели типа BP_x ; 5) качественные показатели разных типов.

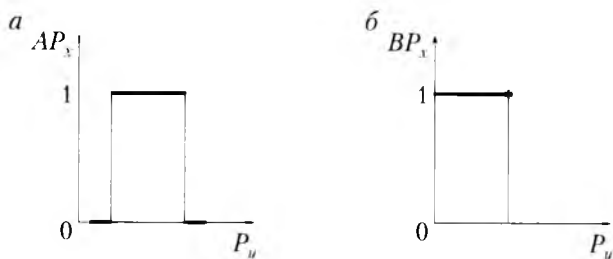


Рис. 1.90. Варианты зависимости качественных показателей AP_x (а) и BP_x (б) от узлового P_u

На рис. 1.91 показана схема точения, где узловым компонентом является режущий клин 1. Узловым показателем в этом случае будет скорость резания, а количественными показателями качества технической системы, на которые влияет узловой показатель, — производительность процесса точения (положительный показатель) и затраты на эксплуатацию резца, связанные с его изнашиванием (отрицательный показатель). Оба показателя качества увеличиваются с увеличением скорости резания. Следовательно, в этом случае есть физическое противоречие. Аналогичная ситуация имеет место при протягивании (рис. 1.92), когда узловым компонентом будет впадина 1 между зубьями протяжки, где должна размещаться стружка, а узловым показателем — шаг t . Этот показатель определяет максимальную длину заготовки, которую можно обработать данной протяжкой, и стоимость протяжки.

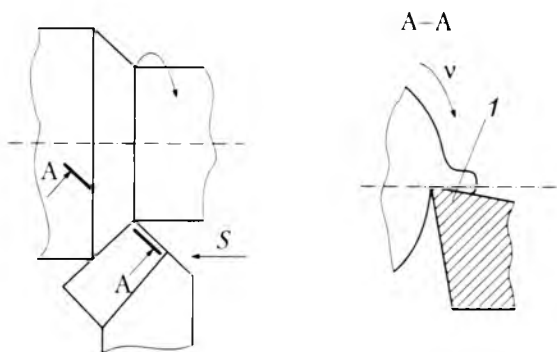


Рис. 1.91. Схема точения (узловой компонент — режущий клин 1)

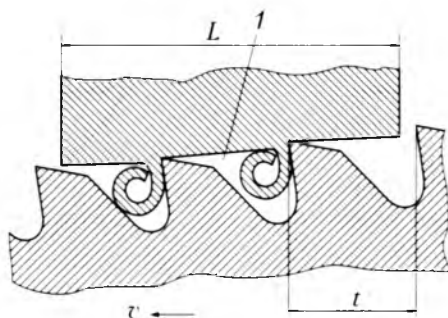


Рис. 1.92. Схема зоны протягивания
(узловой компонент — впадина между зубьями 1)

На рис. 1.93 показана схема фрезерования впадины на фрезерном станке с ЧПУ. Узловой компонент в этом случае — режущая кромка фрезы, а узловой показатель — ширина фрезерования B . Если значение B будет больше некоторого критического значения B_k , возникают автоколебания (отрицательный качественный показатель типа AP_x). Глубина впадины, больше чем B_k , требует обработки в несколько проходов и снижает производительность. Физическое противоречие в этом случае имеет следующую фор-

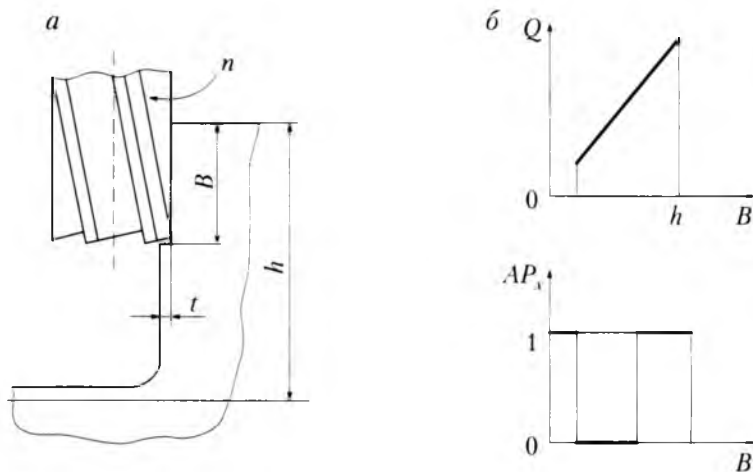


Рис. 1.93. Схемы многопроходного фрезерования впадины (а)
и зависимости показателей от ширины B (б)

мулировку: ширина фрезерования должна быть как можно больше (в пределе равна глубине впадины), что позволит повысить производительность Q ; ширина фрезерования должна быть меньше критической, что позволит предотвратить автоколебания.

В некоторых случаях у узлового компонента системы показатель не может превышать или стать меньше какого-либо предельного значения, т.е. $P_y \leq P_{y\max}$ или $P_y \geq P_{y\min}$. Хотя можно было бы улучшить показатель качества системы за счет, например, увеличения P_y до значений, больших $P_{y\max}$, этого нельзя делать из-за ограничений, которые носят надсистемный или физический характер. Например, желательно увеличивать число вагонов поезда, так как это повышает его вместимость (число перевозимых за один раз пассажиров) и, следовательно, удешевляет перевозки. Однако ограничением для числа вагонов служит длина платформ на станциях. Таким образом, в данной задаче узловой параметр (число вагонов поезда) влияет только на один показатель качества — эффективность перевозок. Чтобы в таких задачах сформулировать техническое противоречие, вводится показатель реализуемости системы. Тогда физическое противоречие для приведенного примера можно сформулировать следующим образом: «Число вагонов поезда должно быть как можно больше, что позволит повысить эффективность перевозок; число вагонов поезда должно быть не более N (фиксированное число), что позволит обеспечить его эксплуатацию при существующей длине платформ».

Выявить физическое противоречие можно также путем построения причинно-следственной цепочки, которая начинается с формулировки недостатка (нежелательного эффекта). Каждое из звеньев этой цепочки (начиная со второго и включая последнее) получается как ответ на вопрос «почему?», адресованный предыдущему звену. Для выявления физического противоречия последнее звено должно отвечать на вопросы «для чего?, зачем?», отражая положительный эффект. Например, при отрезании детали от групповой заготовки (рис. 1.94) последняя отламывается преимущественно в сечении А–А, что является нежелательным эффектом, так как для удаления остатка необходимо выполнять дополнительную операцию, повышающую трудоемкость изготовления детали. Почему деталь в конце отрезания отламывается именно в сечении А–А? Это происходит под действием моментов сил резания P_y, P_z

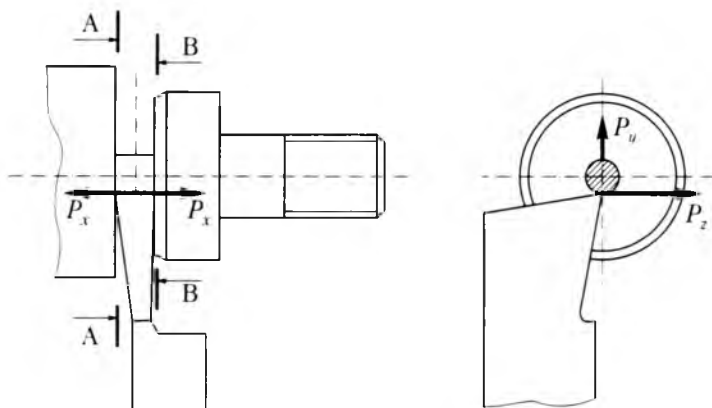


Рис. 1.94. Схема отрезания детали от групповой заготовки

и распирающей силы P_x . А в сечении В–В на отламывание желателен только момент от распирающей силы P_x , так как диаметр остатка в обоих сечениях одинаков.

Для того чтобы ослабить остаток в сечении В–В, применяют резец с углом в плане φ , меньшим 90° (рис. 1.95). Кроме того, стружка направляется на торец отрезаемой детали и создается дополнительный отламывающий момент в нужном сечении. Но изменение направления силы резания повышает вероятность поломки

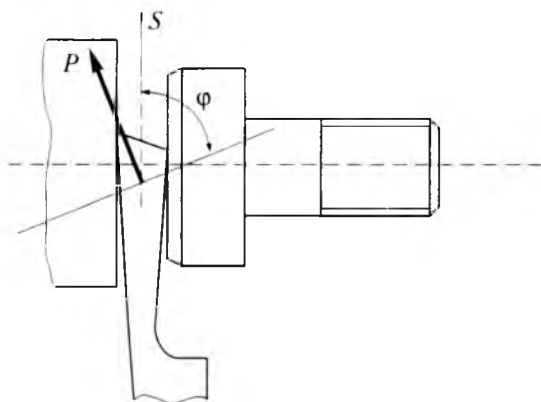


Рис. 1.95. Схема отрезания детали от групповой заготовки резцом с углом в плане $\varphi < 90^\circ$

отрезного резца, так как нарушается симметрия его нагружения в опасном направлении.

Таким образом, можно сформулировать следующее физическое противоречие: угол в плане отрезного резца должен быть равен 90° , что позволит обеспечить условие его устойчивости (понижение вероятности поломки); угол в плане отрезного резца должен быть меньше 90° , что позволит устранить дополнительную операцию по удалению остатка.

Поиск решений может быть информационным и эвристическим.

1.6.2. Информационный поиск

Техническая система обычно состоит из множества взаимосвязанных компонентов. Часть этих компонентов общезвестна. Их конфигурация и другие свойства отражены в соответствующих стандартах, типовых проектах, альбомах внедренных изделий и др. Общезвестные технические решения широко используются в практической работе, чему способствуют учебники, справочная и отчасти периодическая литература. Однако общезвестность — понятие относительное, во многом зависящее от уровня квалификации проектанта.

Но существуют технические решения, которые известны не многим разработчикам. Это, в первую очередь, решения, относящиеся к специфическим техническим системам, информация о которых публикуется в специальной литературе для узкого круга специалистов. Вновь появляющаяся в периодических открытых изданиях информация тоже может быть отнесена к малонизвестной для специалистов, которые не изучают систематически техническую информацию.

Роль научно-технической информации в новых разработках огромна. Разработчик творчески перерабатывает имеющиеся в его арсенале или заимствованные из разных источников технические решения, приспособляя их к конкретным условиям. Но если проанализировать конфигурацию вновь спроектированной технической системы, то можно убедиться, что очень часто существенно новых технических решений в ней мало или совсем нет. Это происходит потому, что часто оказывается легче спроектировать заново техническую систему, чем выловить в океане технической

литературы информацию о том, что такая система уже кем-то разрабатывалась.

Установлено, что объем технической информации удваивается каждые семь лет. Поиск и изучение необходимой информации становится все труднее. В то же время изучение положительного опыта ведущих организаций отрасли является жизненной необходимостью. Так как освоить всю предыдущую техническую информацию невозможно, необходимо сосредоточить внимание на актуальных конкретных вопросах, начиная с новейших достижений и кончая ретроспективными данными. Такое изучение обеспечивает конструктивную и технологическую преемственность и повышает качество разработок. *Преемственность* — это использование в разработках предшествующего опыта данного профиля и смежных отраслей, введение в проектируемую систему всего полезного, что имеется в уже существующих технических системах. Преемственность не ограничивает творческую инициативу разработчика, а помогает находить наилучшее решение.

К источникам научно-технической информации возможных научно-технических решений относятся: специальная литература (учебники, монографии); специальные технические журналы; общетехнические и общенаучные журналы; реферативные журналы.

Производственно-техническая информация представляет собой сведения о новейших достижениях научной и производственной практики. Она содержится в обзорах, реферативных изданиях, информационные листках, в авторских свидетельствах и патентах, в каталогах и проспектах, в нормативно-технической документации (ГОСТ, ОСТ, СТП).

Техническое решение будем называть *типовым*, если оно используется в технических системах одного класса (подкласса), выполняя одну и ту же функцию (группу связанных функций).

Для реализации информационного поиска необходим информационный фонд технических решений, нерархически организованный так, чтобы им было удобно пользоваться. Простейшей формой такого фонда является картотека идей, которая постоянно пополняется по результатам патентного поиска, анализа научно-технических статей и монографий, справочной и рекламной литературы.

При построении картотеки вначале составляется классификатор функций, объединяющий однородные функции в несколько групп. Разработчики формируют фонды технических решений по тем группам функций, с которыми им приходится сталкиваться на практике. В картотеке идей собираются и систематизируются наиболее интересные примеры решения функций — информация о вариантах конструкций, технологических процессов, используемых материалов и пр. Описание типового научно-технического решения должно быть кратким, но достаточно полным, снабжаться эскизами, схемами и графиками. При необходимости дается ссылка на источник получения информации.

Имеющиеся в фондах технических решений наборы вариантов, упорядоченные по функциональным, конструктивным и технологическим признакам и относящиеся как к сложным техническим системам, так и к их компонентам и элементам, способствуют развитию творческого воображения у разработчиков. При этом у них вырабатывается навык постоянно следить за новинками техники, технологии и организации, анализировать тенденции развития технических систем. Работа с вариантами научно-технических решений становится более организованной и систематизированной.

Дальнейшее развитие фонды научно-технических решений получают при их переводе на специальные носители, позволяющие автоматизировать процесс поиска и ведения массивов с помощью компьютерной техники.

Существует два подхода при формировании массивов научно-технических решений. В первом случае создается массив типовых научно-технических систем, выполняющих одинаковые функции, во втором — массив типовых компонентов научно-технических систем. Каждый из компонентов предназначен для выполнения определенных функций.

Проектирование с использованием массива типовых технических систем сводится к выбору допустимого научно-технического решения и удалению из него компонентов, выполняющих ненужные в данном конкретном случае функции, или к добавлению компонентов для выполнения необходимых, но не предусмотренных в типовом решении функций. Желательно, чтобы добавляемые компоненты также выбирались из дополнительного массива типовых

решений. После выбора добавляемых компонентов выполняются процедуры топологического (а иногда и геометрического) синтеза.

Например, в Витебском СКБ зубообрабатывающих, шлифовальных и заточных станков (ЗШ и ЗС) проектирование зубофрезерного автомата ведется на базе нескольких типовых моделей универсального зубофрезерного станка. Из выбранной типовой модели удаляются ненужные кинематические цепи и добавляются типовые компоненты для автоматизации загрузки заготовок и осевой коррекции положения фрезы.

Другим примером использования массива типовых технических систем является практика проектирования технологического процесса изготовления: конкретной детали на базе типового технологического процесса (для изготовления типовой детали). Процесс проектирования сводится к удалению из типового решения лишних для конкретного случая переходов. Затем для оставшихся переходов (операций) выполняются процедуры параметрического синтеза (назначение параметров режимов обработки, расчет затрат материальных, временных и финансовых ресурсов).

Проектирование с помощью массива типовых компонентов сводится к выбору из этого массива набора вариантов компонентов для выполнения всех заданных функций. Выбранные компоненты заносятся в морфологическую таблицу, столбцы которой соответствуют функциям, а строки — вариантам функциональных компонентов (научно-технических решений). Отбирать следует наиболее интересные, перспективные и существенно отличающиеся друг от друга решения из рассматриваемой области техники.

1.6.3. Эвристический поиск

Эвристический поиск базируется на *эвристике* — науке о творческом мышлении и психологии творчества, с учетом системного анализа, исследования операций, теории игр и др. Эвристический поиск часто приводит к решениям с элементами абсолютной новизны, т.е. к изобретениям. Методы эвристического поиска чрезвычайно разнообразны. В настоящее время отсутствует их строгая классификация. Наиболее отчетливым признаком того или иного метода является наличие или отсутствие алгоритма, организующего

мыслительный процесс. По этому признаку можно условно выделить два класса методов:

- методы ненаправленного (малоупорядоченного) поиска;
- методы направленного (упорядоченного) поиска.

К методам ненаправленного поиска научно-технических решений относятся: 1) мозговой штурм, 2) синектика, 3) метод контрольных вопросов. Методы направленного поиска научно-технических решений более эффективны. В их основе лежит научно обоснованный алгоритм творческого процесса, включающий этапы, подэтапы, шаги и процедуры. На одних этапах поле поиска расширяется, на других, наоборот, сужается, исходя из четко поставленной цели. Алгоритм творческого процесса реализуется путем выполнения следующих друг за другом рекомендаций-предписаний, которые носят не случайный, а намеренный (сообразно ходу решения задачи) характер. Здесь синтезу решения предшествуют операции анализа задачи, позволяющие расчленить проблему на частные, более простые задачи. Указанный алгоритм не имеет жесткой структуры. На отдельных этапах могут быть возвраты, повторения «мыслительных проб», попытки решить задачу то одним, то другим приемом.

Общую направленность поиску придает четкая постановка задачи и уяснения ее сущности. Для этого используются понятия технического (физического) противоречия и идеального научно-технического решения. Одним из первых методов направленного поиска является АРИЗ (алгоритм решения изобретательских задач), разработанный в 50-х гг. XX в.

Мозговой штурм — наиболее известный и широко применяемый метод генерирования новых идей путем творческого сотрудничества группы специалистов (как правило, не более 10 человек). Руководитель группы ставит задачу, а участники выдвигают собственные идеи, развивают их и идеи своих коллег, используют одни идеи для развития других. Для обеспечения максимального эффекта мозговой штурм должен подчиняться определенным правилам.

На первой стадии штурма идеи научно-технического решения только выдвигаются и развиваются. Обсуждать, а тем более критиковать их строго запрещается, так как критические замечания уведут к частностям и мешают выдвижению идей. На этом этапе

задача руководителя группы заключается в активизации творческого мышления участников штурма, в обеспечении выдвижения возможно большего числа вариантов решений. При этом предпочтение отдается количеству, а не качеству выдвигаемых идей.

На втором этапе выдвинутые идеи тщательно анализируются, при этом внимание сначала концентрируется на положительных сторонах идей, на попытках найти в каждой идее рациональное зерно. Большой эффект дает комбинирование идей путем составления перечня всех идей выполнения анализируемой функции с указанием преимуществ и недостатков каждого из вариантов. Тогда при обсуждении часто возникают новые идеи, более оригинальные и плодотворные.

Однако не всякая проблема может быть решена мозговым штурмом. Он эффективен главным образом при решении не слишком сложных задач, когда проблема хорошо известна всем участникам заседания. Существует несколько модификаций мозгового штурма. Например, обратный, двойной, письменный и индивидуальный мозговой штурм. Они различаются количеством участников и этапов, способом организации выдвижения и критики идей.

Синектика — комплексный метод стимулирования творческой деятельности. Слово «синектика» обозначает объединение разнородных частей. В основе метода лежит поиск нужного решения за счет преодоления психологической инерции, состоящей в стремлении решить проблему традиционным путем. Синектика позволяет выйти за рамки какого-то конкретного образа мыслей (действий) и значительно расширяет диапазон поиска новых идей за счет представления привычного непривычным и, наоборот, непривычного привычным.

При использовании синектики решение проблемы ищет группа специалистов разных профессий. Рекомендуется, чтобы члены синектической группы (кроме ее руководителя) перед началом работы не знали сути рассматриваемой проблемы, что позволяет им абстрагироваться от привычного стереотипа мышления. Обычно заседание группы начинается не с формулирования проблемы в целом, а с обсуждения отдельных ее аспектов, намеченных руководителем. Это могут быть, например, физические условия, в рамках которых ищут решение.

Одна из важнейших частей синектической процедуры — выяснение того, как участники представляют себе обсуждаемую проблему. Для этого они, включая эксперта, предлагают свои варианты ее определения. Руководитель записывает их на доске. В дальнейшем руководитель задает наводящие вопросы, вызывающие ассоциации и аналогии. На синектических заседаниях широко используется личная аналогия (эмпатия). С помощью такого приема человек мысленно входит в образ рассматриваемого объекта, т.е. старается как бы отождествить себя с ним, проанализировать возникающие ощущения. Это помогает в поиске новых вариантов осуществления функций.

Метод контрольных вопросов также применяется для активизации творческого процесса. Наводящими вопросами разработчик подводится к решению задачи. Метод может применяться как в индивидуальной работе, так и при коллективном обсуждении проблемы, например при мозговом штурме. Для реализации метода разными авторами разработаны вопросники. Вопросник А. Осборна включает 9 групп вопросов:

- 1) Какое новое применение объекта можно предложить?
- 2) На какой другой объект похож рассматриваемый и что можно с другого скопировать?
- 3) Какие возможны модификации путем вращения, изгиба, скручивания, поворота, изменения функции, цвета, формы?
- 4) Что можно в ТС увеличить (размеры, прочность, скорость, число элементов и т.д.)?
- 5) Что можно в ТС уменьшить (размеры системы или ее элементов, плотность, время действия и т.д.)?
- 6) Что можно в ТС заменить (компонент, материал, привод и т.д.)?
- 7) Что можно в ТС преобразовать (компоновку, порядок выполнения функций и т.д.)?
- 8) Что можно в ТС сделать наоборот?
- 9) Какие новые комбинации компонентов ТС возможны?

Нетрудно заметить, что в данных вопросах содержатся рекомендации опробовать ту или иную идею изменения исходной технической системы для решения поставленной задачи. Эти идеи принято называть эвристическими приемами. Они разработаны

на основании анализа значительного числа технических решений (заслуживших выдачи авторских свидетельств и патентов на изобретение), при помощи которых были решены задачи усовершенствования технических систем.

Эвристический прием представляет собой, по сути дела, обобщенное типовое техническое решение, которое не является подробно описанным компонентом ТС, а содержит только идею изменения прототипа. Впервые эвристические приемы разрабатывались советским изобретателем Г.С. Альтшуллером в середине XX в. В дальнейшем А.И. Половинкиным был разработан общеотраслевой фонд эвристических приемов, в который добавлены приемы из фонда Г.С. Альтшуллера. Общеотраслевой фонд содержит 11 групп, объединяющих эвристические приемы по характеру решаемой научно-технической задачи.

Недостатками разработанного фонда эвристических приемов являются его громоздкость (он объединяет более ста приемов) и отсутствие связи между требуемой функцией, недостатком или техническим противоречием и приемом, который позволяет решить задачу. Образуется слишком широкое поле для выбора. Г.С. Альтшуллером разработана таблица выбора приемов для устранения технических противоречий. Таблица имеет два входа: 1) что нужно изменить по условиям задачи; 2) что ухудшается при изменении. На пересечении соответствующих строки и столбца в таблице записаны номера эвристических приемов, с помощью которых можно устранить противоречие: 1) заранее выполнить требуемое действие; 2) вместо действия, диктуемого условиями задачи, выполнять обратное действие; 3) сделать неподвижную часть объекта или внешней среды движущейся; 4) использовать электрические, магнитные и электромагнитные поля для взаимодействия с объектом; 5) перейти от неподвижных полей к движущимся; 6) применить сильные окислители (воздух с кислородом или с озонированным кислородом).

Из указанных приемов для разработки изобретений были использованы третий и четвертый. Замена неподвижных относительно корпуса режущих элементов резцов и торцевых фрез вращающимися (самовращающимися) позволила разработать целую гамму инструментов для ротационной обработки резанием. Пример схемы работы такого резца приведен на рис. 1.96. Чашечная

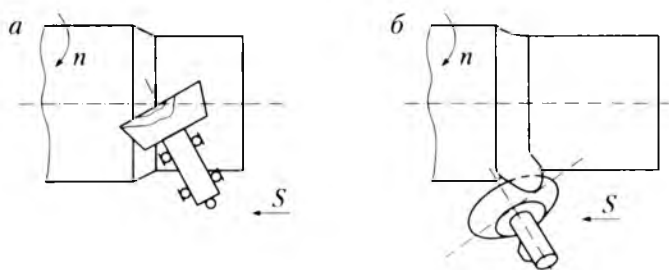


Рис. 1.96. Схемы прямого (а) и обратного (б) ротационного точения

режущая пластина вращается сходящей стружкой и благодаря кратковременности нахождения ее рабочей части в зоне резания не успевает нагреться до высокой температуры, вызывающей повышенный износ. Это позволяет в несколько раз повысить скорость резания и, следовательно, производительность.

Четвертый прием можно было применить при разработке метода обработки резанием труднообрабатываемых материалов. Для повышения обрабатываемости разработан комбинированный метод точения, при котором срезаемый слой подогревается электрическим током или плазмой [9]. Экспериментально установлено, что шлифование в среде кислорода существенно повышает обрабатываемость нержавеющей стали, которая в обычных условиях шлифуется очень плохо. Последнее замечание относится к шестому эвристическому приему.

Например, чтобы повысить производительность процесса, необходимо повысить скорость резания при точении. Но при этом увеличивается скорость изнашивания режущей части резца, т.е. потеря вещества.

В.И. Голдовский и М.Н. Вайнерман предлагают набор эвристических приемов, направленных на ликвидацию некоторых обнаруженных нежелательных эффектов, что, как и таблица выбора приемов преодоления технических противоречий Г.С. Альтшуллера, несколько увеличивает поиск.

Бывают ситуации, когда попытка использовать подсказки с помощью таблицы Г.С. Альтшуллера не дает результатов. Поэтому для сокращения объема перебираемых эвристических приемов лучше сформировать персональный фонд эвристических приемов, в который из общепромышленного фонда отбираются наиболее подходящие

исходя из специфики предполагаемых для решения задач, приверженности определенным приемам, предыдущей подготовки. Для каждого эвристического приема персонального фонда необходимо подобрать несколько примеров использования из своей области или функционально близких областей. Эти примеры могут использоваться как готовое или полуготовое решение.

1.6.4. Эвристические методы направленного поиска

К эвристическим методам направленного поиска, кроме АРИЗ, относятся:

- обобщенный эвристический метод (ОЭМ);
- комплексный метод поиска технических решений (КМП) и параметрический метод разрешения противоречий в технике (ПМП).

Эвристический алгоритм, как говорилось ранее, представляет собой строго определенную последовательность (систему) предписаний, своего рода алгоритмизированную инструкцию, указывающую, что и как должен делать человек, чтобы решить задачу. При этом, в отличие от алгоритма для ЭВМ, предписания метода являются не строго доказанными, а эвристическими. Следует отметить, что алгоритмическая форма метода не гарантирует его направленности. Так, стратегия семикратного поиска, имеющая вид эвристического алгоритма и предполагающая применение матриц 7×7 , по механизму поиска близка к морфологическому, который является методом ненаправленного, но систематического перебора вариантов сочетаний частных технических решений.

Заметный скачок в повышении направленности был сделан в модификации АРИЗ-77. Но, справедливо отвергая метод проб и ошибок как средство поиска решений, АРИЗ «предал анафеме» перебор вариантов вообще. АРИЗ-77 построен так, будто всегда должен получиться один вариант технического решения, предпочтительность которого гарантируется правильностью выполнения формальных правил алгоритма, отражающих в основном внутреннее функционирование технической системы. В этом случае степень направленности превысила допустимый уровень, обусловленный достигнутым проникновением в суть процесса поиска новых решений. И поэтому метод стал излишне жестким. Фактически

сделана попытка распространить АРИЗ-77, хорошо решающий некоторые типы задач, на решение всех типов проектных задач.

Версия АРИЗ-85-В отличается более подробной регламентацией перехода от формулирования задачи к физическому противоречию, а также анализом и использованием ресурсов системы и ее окружения. Но логика АРИЗ-85-В предусматривает остановку при получении одного (первого) технического решения и остается излишне жесткой.

В *обобщенном эвристическом методе* выделяются два типа задач: устранение недостатков известных ТС и поиск принципиально новой ТС. Но алгоритм поиска для обоих типов задач одинаков. Этот метод использует шесть массивов информации, из них три общетехнические (физико-технические эффекты, эвристические приемы, методы оценки и выбора вариантов), остальные должны создаваться для каждого вида ТС.

По степени формализации процедур комплексный метод на сегодня является рациональной серединой между ОЭМ (с его низкой направленностью) и АРИЗ (с его избыточной формализацией). Состав поисковых процедур метода минимально необходим и достаточен для решения задач.

Комплексный метод использует три массива: 1) массив типовых форм разрешения противоречий; 2) массив принципов идеальности; 3) массив физических явлений и эффектов. Для его реализации нужно использовать следующие инструкции (операторы): 1) оператор анализа задачи; 2) оператор определения конечной цели решения; 3) оператор ориентирующего поиска направления решения; 4) оператор выявления противоречия в ТС; 5) оператор разрешения противоречия в ТС; 6) оператор структурно-энергетический; 7) оператор функционального синтеза подсистемы; 8) оператор построения модели задачи; 9) оператор построения модели решения; 10) оператор сравнения вариантов; 11) оператор переноса решений. Из семи этапов обязательны первый, шестой и седьмой. А в зависимости от характера задачи (достройки и противоречия) используются либо этапы с индексом С, либо с индексом У.

Операторы представляют собой подробные предписания, разъясняющие порядок выполнения отдельных процедур основной последовательности действий. Они могут также служить специальными инструментами для преобразования задачи и синтеза решения.

Комплексный метод в полном объеме предназначен для решения сложных задач и для выработки общих навыков поиска новых научно-технических решений. Ряд несложных задач может быть решен непосредственным использованием массивов информации. Отдельные операторы могут использоваться самостоятельно (например, операторы выбора направления решения и сравнения вариантов).

Ниже рассмотрены некоторые процедуры комплексного метода поиска технических решений.

У.3.2. Построить модель задачи.

Данная процедура предполагает упрощение исходной ТС за счет освобождения от лишней, не связанной с НЭ информации. В общем случае в этой процедуре возможны три типовые модели задачи:

1. Дано (указать изделие ТС, т.е. то, на что она воздействует). Необходимо построить ТС, выполняющую ГПФ (указать).
2. Даны компоненты ТС (указать их). Необходимо достроить ТС для выполнения требуемой дополнительной функции.
3. Даны компоненты, связанные с противоречием (указать). Необходимо разрешить противоречие (указать какое).

Не следует считать, что суть процедуры У.3.2 заключается лишь в «механическом» освобождении от лишней информации. Здесь имеется возможность смены типа решаемой задачи (переход от модели задачи 3 к модели 1). Такой переход фактически эквивалентен разрушению имеющейся ТС. Идти на это следует лишь в том случае, если есть убедительные доказательства, что принцип действия улучшаемой системы исчерпал себя. Если их нет, то лучше оставить модели задачи 3 или 2.

У.3.4. Построить оперативную модель решения.

Оперативная модель решения по своему смыслу является образом будущего решения задачи, но, с другой стороны, она — предел уточнения задачи, т.е. ее окончательная формулировка. Поэтому, как и всякая задача, формулировка модели решения содержит цель и ограничения, а как прообраз решения — должна содержать указание на средство решения. После формулирования цели анализируется область пространства (рабочая зона), в которой она может быть достигнута. Для задачи на построение или достройку ТС выделяется функциональная зона, а для случая разрешения противоречия выделяется конфликтная зона НЭ и зона ПЭ. В некоторых случаях зоны ПЭ и НЭ могут совпадать.

В общем случае в рабочую зону могут входить несколько разных компонентов системы, а также часть окружения ТС. Если какой-либо компонент (часть компонента), как необходимое средство для достижения цели, не оговорен, то выбор компонента модели решения довольно затруднителен. В таком случае следует выбирать компонент рабочей зоны, который легче всего изменить без нарушения ограничений. К таким компонентам вероятнее можно отнести инструменты ТС, чем ее изделия, а также неподвижные компоненты, чем подвижные.

Если выбор компонента как средства достижения цели затруднен, то в качестве компонента модели решения следует принять всю рабочую зону. Ее можно рассматривать как некоторый компонент X , которому дозволено придать нужные свойства. Последующий анализ позволит конкретизировать средство модели решения.

1.6.5. Методы разрешения (преодоления) физических противоречий

Физическое противоречие можно разрешить (устранить) путем замены узлового компонента компонентом с парными свойствами или за счет изменения условий, в которых он функционирует. Компонент с парными свойствами обладает хотя бы двумя однотипными свойствами, которые могут проявиться только в определенных условиях. Например, твердое тело, высотой и шириной которого можно пренебречь, характеризуется двумя линейными размерами L_1 и L_2 при условии, что:

- форма его — спираль (кольцо);
- L_1 — длина спирали (длина окружности кольца);
- L_2 — габаритный размер спирали (диаметр кольца).

Либо компонент характеризуется двумя линейными скоростями v_1 и v_2 при условии, что:

- компонент — пружинный маятник;
- v_1 — линейная скорость груза маятника;
- v_2 — линейная скорость элементов крепления пружины.

Массив компонентов с парными свойствами состоит из компонентов шести классов. К первому классу относятся компоненты, состоящие из одного элемента (O), который характеризуется двумя однотипными свойствами (C_1 , C_2). Ко второму классу относятся

компоненты, состоящие из одного элемента, который характеризуется одним свойством, изменяющимся в зависимости от пространственной координаты X . К третьему классу относятся компоненты, состоящие из одного элемента, который характеризуется свойством, изменяющимся во времени. К четвертому классу относятся компоненты, состоящие из двух элементов (O_1, O_2), которые характеризуются однотипными свойствами (соответственно C_1 и C_2). К пятому классу относятся компоненты, состоящие из двух, находящихся во временном отношении элементов, которые характеризуются однотипными свойствами. К шестому классу относится любая система, которая характеризуется тем же свойством, что и ее элемент.

Для устранения физических противоречий предлагаются 14 эвристических приемов, каждый из которых представляет собой предписание или указание, как преобразовать имеющееся техническое решение или в каком направлении искать, чтобы решить поставленную задачу.

Следует различать два вида решений:

- принципиальное;
- научно-техническое.

Второе получается из первого за счет конкретизации значений ряда показателей компонента с парными свойствами, включенного в состав исходной системы, или за счет уточнения степени изменения условий функционирования узлового компонента. В каждом эвристическом приеме используется компонент с парными свойствами определенного класса (табл. 1.47).

Таблица 1.47

Зависимость класса компонента с парными свойствами от номера эвристического приема

Номер приема	4, 10, 13	2, 5	6, 7	1, 12	8, 11	3, 9, 14
Класс компонента	1	2	3	4	5	6

Приемы устранения физических противоречий в приводимом ниже перечне расположены не случайным образом, а в соответствии со следующим правилом: чем меньше номер приема, тем выше вероятность с его помощью устранить физическое противоречие. Во-вторых, в тех приемах, которые направлены на замену

узлового компонента (1–4; 7–10; 13) или изменение уровня его рассмотрения (14), неявно предполагается, что условия, в которых находятся данный и новый компоненты, совпадают.

Прием 1: узловой компонент заменить компонентом, состоящим из двух элементов, каждый из которых характеризуется одним из значений показателя, указанного в формуле физического противоречия.

Например, известна силовая конструкция, изготовленная из коррозионностойкого материала и работающая в агрессивной среде. Она характеризуется такими показателями, как длительность эксплуатации и стоимость. Если принять в качестве узлового компонента силовую конструкцию, а в качестве узлового показателя — тип материала, из которого она изготовлена, то можно сформулировать следующее физическое противоречие:

силовая конструкция должна быть изготовлена из материала типа К (коррозионностойкий), что позволит увеличить длительность ее эксплуатации; силовая конструкция должна быть изготовлена из материала типа Д (некоррозионностойкий), что позволит уменьшить ее стоимость.

Принципиальное решение: заменить силовую конструкцию, изготовленную из коррозионностойкого материала, на конструкцию, изготовленную из «дешевой» стали, но имеющую коррозионностойкое покрытие.

Прием 2: узловой компонент заменить компонентом, различные части которого имеют различные значения показателя, указанного в формуле физического противоречия.

В качестве примера можно привести решение, показанное на рис. 1.97. Ступенчатая балка (рис. 1.97, б), изготовленная фрезерованием из проката, заменена гиперболической балкой (рис. 1.97, а), изготовленной ковкой. Это решение позволяет устранить следующее физическое противоречие:

площадь поперечного сечения балки должна быть $S = hb$, что позволит обеспечить передачу нагрузки P ; площадь поперечного сечения балки должна быть как можно меньше, что позволит уменьшить ее массу.

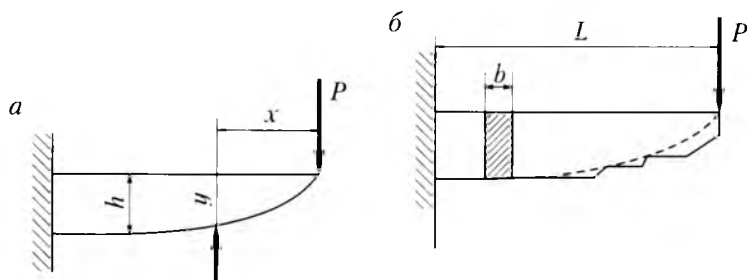


Рис. 1.97. Схемы балки с оптимальной продольной формой (разрешение физического противоречия):
а — гиперболической; б — ступенчатой

Прием 3: узловой компонент заменить компонентом, состоящим из множества одинаковых элементов, каждый из которых характеризуется одним значением показателя, указанного в формуле физического противоречия, а компонент в целом — другим значением.

Например, для подвода электрического тока к металлической пластине 1 через диэлектрическую ткань 2 используется электрошина 3, часть которой выполнена в виде иглы (рис. 1.98, а). Эта система характеризуется такими показателями, как сила тока, протекающего по электрошине, и степень повреждения диэлектрической ткани. Если взять в качестве узлового компонента электрошину, а в качестве узлового показателя — площадь контакта иглы электрошины с пластиной, то можно сформулировать следующее техническое противоречие:

площадь контакта должна быть как можно больше, что позволит увеличить силу тока, проходящего по шине; площадь контакта должна быть как можно меньше, что позволит уменьшить степень повреждения диэлектрической ткани.

Принципиальное решение: заменить электрошину с одной иглой электрошиной с множеством игл меньшего диаметра (рис. 1.98, б).

Прием 4: узловой компонент заменить компонентом с парными свойствами, который характеризуется двумя показателями, аналогичными узловому показателю, каждый из которых имеет одно из значений, указанных в формуле физического противоречия.

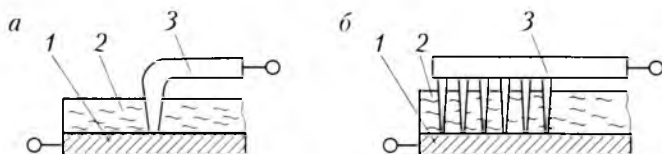


Рис. 1.98. Схемы исходного (а) и производного (б) технических решений, полученных разрешением ФПр при помощи приема 3

Например, система характеризуется двумя линейными размерами L_1 и L_2 при условии, что L_1 — линейный размер системы; L_2 — линейный размер элемента системы (это, например, трос, пружина, порошок и т.п.).

Прием 5: изменить условия, в которых находится узловый компонент, таким образом, чтобы его различные части имели различные значения показателя, указанного в формуле физического противоречия.

Например, для поверхностной закалки необходимо, чтобы подповерхностный слой материала закаливаемой детали был нагрет до температуры, достаточной для структурных превращений, а внутренняя часть имела значительно меньшую температуру. Такое противоречие устраняется, если изменить условия нагрева, т.е. заменить нагрев в печи нагревом в высокочастотном магнитном поле и, соответственно, ограничить время нагрева, чтобы температура по сечению детали не успела выровняться за счет теплопроводности.

Прием 6: изменить условия, в которых находится узловый компонент, таким образом, чтобы в различных стадиях (фазах) жизненного цикла исходной системы он характеризовался различными значениями показателя, указанного в формуле физического противоречия.

К стадиям жизненного цикла относятся: изготовление, транспортирование, хранение, комплектация, функционирование, ремонт, утилизация и т.д. Например, при круглом врезном шлифовании показатель шероховатости Ra шлифованной поверхности возрастает с увеличением скорости S поперечной подачи. Возникает физическое противоречие:

S должна быть достаточно большой, чтобы увеличить производительность процесса шлифования; S должна быть достаточно малой, чтобы обеспечить заданное значение Ra .

Для его разрешения делят рабочий цикл шлифования на два последовательных этапа. На первом назначается достаточно большая предварительная скорость подачи: $S = S_1$, на втором — достаточно малая: $S = S_2$.

Прием 7: узловой компонент заменить компонентом, который на различных стадиях (фазах) жизненного цикла исходной системы характеризуется различными значениями показателя, указанного в формуле физического противоречия.

Например, известна трансформируемая космическая антенна, состоящая из сферической полимерной оболочки, в материал которой «заделана» металлическая сетка. При выведении данной антенны в космическое пространство она свернута в рулон небольшого размера. На орбите во внутреннюю полость оболочки подается газ, в результате чего она разворачивается и приобретает сферическую форму. Затем газ удаляется и антенна готова к работе. Однако эта простая система имеет один трудно устранимый недостаток — под действием «солнечного ветра» антенна начинает менять свою орбиту.

Если принять в качестве узлового компонента оболочку, а в качестве узлового показателя — ее наличие в системе, то можно сформулировать следующее физическое противоречие:

оболочка должна использоваться (быть) в системе, что позволит обеспечить ее развертывание; оболочка не должна использоваться (быть) в системе, что позволит избежать воздействия на антенну «солнечного ветра».

Принципиальное решение: заменить оболочку, устойчивую в условиях космического пространства, на оболочку, которая разрушается в этих условиях в течение короткого времени. (Оболочка должна быть сделана из полимерной пленки, которая деполимеризуется под действием ультрафиолетовой части излучения солнца.)

Прием 8: узловой компонент заменить компонентом, который претерпевает превращение (например, фазовое) в другой компонент; при этом каждый из них характеризуется одним из значений показателя, указанного в формуле физического противоречия.

В качестве конкретного примера применения данного приема можно рассмотреть проводник плавкого предохранителя. Он позволяет устранить следующее техническое противоречие:

потребитель электрической энергии должен быть соединен с электросетью, что позволит обеспечить его функционирование; потребитель электрической энергии должен быть отсоединен от электросети, что позволит предотвратить его поломку при увеличении протекающего тока сверх норматива.

Прием 9: включить узловой компонент в состав системы, которая характеризуется одним значением показателя, указанного в формуле физического противоречия, а узловой компонент — другим значением.

Прием 10: узловой компонент заменить компонентом, который характеризуется показателем, аналогичным узловому показателю, с таким значением, что его по отношению к различным внешним объектам можно было бы считать «различным».

В качестве конкретного примера применения данного приема можно рассмотреть заглушку, которая является «пористой» для гелия и «сплошной» для паров натрия. Она применяется в тепловых жидкометаллических трубах космической энергетической установки.

Прием 11: изменить условия, в которых находится узловой компонент, таким образом, чтобы он превратился (например, за счет фазового перехода) в другой компонент, причем перед превращением он характеризовался бы одним значением показателя, указанного в формуле физического противоречия, а после превращения — другим значением.

Например, данный прием позволяет устранить следующее физическое противоречие:

теплоноситель должен быть жидким, что позволит перекачивать его по трубопроводу, теплоноситель должен быть твердым, что позволит предотвратить утечку при ремонте трубопровода.

Для этого необходимо перед ремонтом соответственно изменить температуру теплоносителя.

Или следующее:

режущая кромка резца должна быть острой, чтобы им можно было обтачивать, режущая кромка резца должна быть тупой (скругленной достаточно большим радиусом), чтобы им можно было выглаживать.

Для решения этого противоречия перед проходом выглаживания резец поворачивается на 180° и рабочей становится его скругленная задняя поверхность.

Прием 12: изменить условия, в которых находится узловый компонент, таким образом, чтобы одна из его частей претерпевала превращения (например, за счет фазового перехода) в другой объект, который характеризуется одним значением показателя, указанного в формуле физического противоречия, а оставшаяся часть узлового компонента — другим значением.

Например, для предотвращения кавитационного разрушения подводных крыльев судна необходимо уменьшить скорость их обтекания водой, но при этом резко падает подъемная сила крыла. Если принять в качестве узлового компонента воду, обтекающую крыло, а в качестве узлового показателя — ее скорость относительно крыла, то можно сформулировать следующее техническое противоречие:

относительная скорость воды должна быть как можно больше, что позволит увеличить подъемную силу; относительная скорость должна быть как можно меньше, что позволит увеличить долговечность крыла.

Принципиальное решение: изменить условия течения воды относительно крыла таким образом, чтобы тот ее слой, который непосредственно взаимодействует с крылом, имел бы низкую скорость, а остальная ее часть — высокую.

Техническое решение: поверхность крыла охлаждается до температуры ниже 0°C . В результате на поверхности крыла образуется тонкая корка льда (вода с нулевой скоростью), которая защищает крыло от кавитационного разрушения.

Прием 13: изменить условия, в которых находится узловый компонент, таким образом, чтобы он характеризовался двумя различными показателями, аналогичными узловому показателю, каждый из которых имел бы одно из значений, указанных в формуле физического противоречия.

Например, некоторые изотропные оптические тела при одноосном сжатии или растяжении приобретают свойства оптически одноосных кристаллов и в различных направлениях наблюдения имеют в проходящем свете различную окраску. Следовательно после изменения условий нагружения эти тела превращаются в объекты с парными свойствами.

Прием 14: рассмотреть узловый компонент как систему, которая характеризуется одним значением показателя, указанного в формуле физического противоречия, а один из его элементов — другим значением.

При использовании приведенных эвристических приемов рекомендуется придерживаться следующих правил:

□ если указанные в формуле физического противоречия показатели характеризуют исходную систему на различных стадиях и фазах жизненного цикла, то лучшие результаты дает применение приемов устранения физического противоречия «во времени» — приемы 6, 7, 8, 11;

□ если указанные в формуле физического противоречия показатели одновременно присущи исходной системе, то лучшие результаты дает применение приемов устранения физического противоречия «в пространстве» — приемы 1, 2, 5, 12;

□ если по условиям задачи замена узлового компонента недопустима, то лучшие результаты дает применение приемов «изменения условий» — приемы 5, 6, 9, 11, 12, 13;

□ если требования к узловому компоненту сформулированы с точки зрения различных внешних объектов или исходя из различных систем отсчета, то наилучшие результаты дает применение приемов устранения физических противоречий «в отношениях» — приемы 10, 14;

□ если требуется получить наиболее простое решение поисковой задачи, то наилучший результат дает применение приемов 3, 4, 10.

Техническое решение (описание компонента технического устройства или технологической операции) считается допустимым, если оно удовлетворяет определенному списку требований (ограничений), который сформирован на этапе постановки и уточнения задачи.

Поиск технических решений производится для решения следующих задач:

- улучшение действующей технической системы (ее компонентов) за счет устранения имеющихся в ней недостатков;
- выбор технической системы для выполнения заданной функции из некоторого массива известных технических систем;
- выбор компонентов и синтез из них технической системы для выполнения заданной функции.

Метод, который лучше всего использовать для поиска технического решения, зависит от причины, порождающей недостаток. Это может быть функциональная неполнота и техническое (физическое) противоречие.

Техническое противоречие возникает в тех случаях, когда некоторое улучшение одних показателей качества системы приводит к ухудшению других. Оно возникает почти всегда при попытках как-то улучшить систему, но существенно обостряется, когда ухудшение приближается к допустимой границе или превышает ее.

1.6.6. Алгоритм поиска научно-технических решений и примеры поисковых задач

Источником информации для поиска в данном случае является массив эвристических приемов преодоления технических и физических противоречий. Необходимость в преодолении противоречий возникает не только при необходимости устранить недостатки в заданной технической системе, но и как дополнительный этап при построении технической системы для выполнения заданной ГПФ, достройке технической системы компонентами для выполнения требуемой добавочной полезной функции (ПФ). Порядок и содержание процедур постановки задачи и синтеза технического решения указаны ниже. Исходная проблемная ситуация описывается в условии задачи.

Этап 1. Постановка и уточнение задачи

1.1. Выполнить предварительный анализ научно-технической проблемы. Для чего:

1.1.1. Выбрать вариант проблемы:

1.1.1а. Для выполнения некоторых из заданных ПФ в рассматриваемой технической системе нет соответствующих компонентов (функциональная неполнота):

1.1.1б. техническая система выполняет все ПФ, но недостаточно хорошо (есть НЭ).

1.2. Определить, в какую надсистему входит (должна входить) рассматриваемая технической системой. Выделить ее связи с надсистемой.

1.3. Если выбран вариант 1.1.1б, то определить, с какими компонентами имеющейся технической системы связан НЭ.

1.4. Сформулировать конечную цель решения задачи.

1.5. Определить главные ограничения. (Какие средства заведомо нельзя применять? Какие средства нельзя изменять? Какие средства нужно обязательно использовать?)

1.6. Определить возможные пути достижения конечной цели (кроме пути, указанного в проблемной ситуации) и сравнить их с ограничениями.

1.6.1. Если все пути, кроме описанного в проблемной ситуации, запрещены ограничениями, то перейти к задаче: «Все, что есть, минус недостатки». Если ограничения разрешают реализацию нескольких путей, то сравнить их между собой и выбрать наиболее предпочтительный.

1.7. Для выбранного пути решения уточнить ограничения. (Какие характеристики заведомо нельзя изменять? Какие «способности», кроме функций, должна иметь искомая техническая система? Какова допустимая сложность решения? Какой требуется количественный уровень критериев предпочтения?)

1.8. Записать условие задачи, соответствующее выбранному пути решения, не используя специальных терминов, по одной из следующих форм:

1.8.1. Дана ТС, состоящая из компонентов (указать). Для выполнения еще одной ГПФ не хватает компонентов, которые необходимо выбрать. Перейти к шагу 2.1.

1.8.2. Дана ТС, состоящая из компонентов (указать). При условии (указать) возникает нежелательный эффект (указать недостатки), который необходимо устранить. Перейти к шагу 3.1.

Этап 2. Функциональный синтез (достройка) технической системы

2.1. Сформулировать дополнительную ГПФ для достраиваемой ТС. Составить список требуемых функций для проектируемой ТС. ПФ, относящиеся к прототипу, считаются заданными в ограничениях.

2.2. Определить входы и выходы достраиваемой части ТС. Отметить энергопотoki, проходящие через достраиваемую часть, и требования к ним (состав, вид энергии, типы превращений, основные и управляющие потоки, особенности пространственно-временной организации энергетических потоков).

2.3. Разделить ПФ на группы по степени их влияния на выполнение ГПФ. Выделить группу основных ПФ, которые в наибольшей степени определяют выполнение ГПФ. Из числа основных выделить центральную ПФ, которая в наибольшей степени влияет на выполнение ГПФ.

2.4. Наметить возможные варианты компонентов ТС (КТС) для выполнения заданных ПФ, пользуясь массивом типовых технических решений, с учетом ограничений, требований к энергопотокам и их пространственно-временной организации. Намечать варианты КТС необходимо поочередно, начиная с обеспечения центральной ПФ и далее по мере уменьшения значимости для выполнения ГПФ. По мере выбора КТС необходимо, учитывая связи между ними, уточнять требования к еще ненамеченным.

2.5. Сравнить между собой варианты центрального КТС и выбрать два-три наиболее предпочтительных по обеспечению критериев предпочтения. Учесть требования, предъявляемые к системе в целом.

2.6. Присоединяя в порядке, указанном на шаге 2.4, к центральному КТС связанные с ним основные, а также другие КТС, заданные ограничениями, произвести выбор вариантов этих КТС и их увязку (согласовать входы и выходы). Примечания: 1) если при взаимной увязке КТС можно объединить их элементы, то выполнить объединение; 2) если при объединении и взаимной увязке

КТФ возникает необходимость введения дополнительных КТС, вернуться к шагу 2.4 и выполнить шаг 2.6.

2.7. Рассмотреть комплексы КТС, полученные на шаге 2.6, сравнить их между собой и выбрать в соответствии с критериями предпочтения несколько наиболее предпочтительных.

2.8. Довести до конца синтез ТС, присоединяя к комплексам, выбранным в 2.7, остальные КТС. Если при заданных ограничениях взаимная увязка КТС не получается, выявить соответствующие противоречия и разрешить их, видоизменяя КТС и связи между ними.

2.9. Описать полученную ТС (техническое решение). Указать состав и взаимодействие компонентов.

2.10. Выполнить анализ полученных ТС: 1) проверить энергетическую и функциональную полноту; 2) определить входы и выходы; 3) определить, соответствует ли степень управляемости ТС условиям ее функционирования.

2.11. Выявить отличия полученных характеристик ТС от заданных:

- 1) есть ли недостающие полезные выходы (способности);
- 2) есть ли дополнительные входы;
- 3) есть ли дополнительные бесполезные выходы;
- 4) есть ли отступления от требований главных ограничений;
- 5) достаточна ли степень управляемости ТС.

Если отличий нет, перейти к шагу 2.13, если есть — к шагу 2.12.

2.12. Устранить недопустимые отличия характеристик ТС от заданных. Для этого: 1) выделить среди выявленных отличий явно недопустимые; 2) видоизменить конфигурацию ТС, устраняя недопустимые отличия с помощью массива типовых технических решений. Если последнее невозможно, выявить технические (физические) противоречия, обострение которых мешает устранить недопустимые отличия (перейти к шагу 3.1).

2.13. Описать полученную после видоизменения ТС. Указать конфигурацию ТС. Привести схематическую модель ТС.

Этап 3. Преобразование технической системы

3.1. Выявить природу НЭ, указанного в 1.8.2. Выявить и сформулировать техническое противоречие, обострение которого проявилось в виде НЭ.

3.2. Построить модель задачи (что дано и что требуется без специальных терминов). Уточнить формулировку НЭ, который необходимо устранить (подцель, которую необходимо достигнуть), для решения задачи.

3.3. Определить направление разрешения противоречия (количественные изменения, изменения формы, преобразования в пространстве или во времени, преобразование движения или силы, преобразование материала, преобразование структуры, дифференциация, использование профилактических мер или резервов).

3.4. Построить оперативную модель решения. Для этого: а) определить цель модели решения с учетом модели задачи и выбранного направления решения; б) определить область пространства (рабочую зону), в которой должна быть реализована модель решения; в) в рабочей зоне выбрать элемент модели решения и уточнить условия, выполнение которых должен обеспечить этот элемент; г) составить формулировку оперативной модели решения.

3.5. Отобразить модель решения графически на условном рисунке, схеме, графике. Показать два состояния: исходное (было) и соответствующее (стало).

3.6. Определить физические условия реализации модели решения.

3.6.1. Определить, какими физическими свойствами должен обладать элемент модели решения или какие действия он должен осуществлять, чтобы обеспечить реализацию модели решения. Составить полный перечень свойств и действий.

3.7. Составить формулировки физических противоречий и выплнить их предварительный анализ.

3.7.1. Для каждой пары несовместимых требований составить формулировку физических противоречий. Если получено одно или несколько физических противоречий, соответствующих исходному техническому противоречию, заданному в модели задачи, перейти к шагу 4.1.

Этап 4. Синтез решения

4.1. Разрешить противоречия и сформулировать принципиальное решение. Определить, при каких условиях элемент модели решения будет иметь свойства или совершать действия, составляющие физические противоречия. При этом:

а) следует отвлечься от вопроса, осуществимы ли практически желательные условия;

б) принципиальное решение должно отражать новую организацию системы (в том числе во времени и в пространстве), при которой несовместимость свойств или действий, составляющих физические противоречия, не является абсолютной;

4.2. Сформулировать физическое решение, реализующее модель решения.

4.2.1. В соответствии с выявленными на шаге 3.6 свойствами и действиями или полученным на шаге 4.1 принципиальным решением сформулировать подзадачу синтеза, которая должна быть решена: замена (изменение) элемента ТС, доработка или построение компонента ТС. Если из формулировки подзадачи очевидным образом вытекает физическое решение, перейти к шагу 4.2.5.

4.2.2. Определить, как должен быть изменен (заменен) элемент модели решения, другие элементы, какое воздействие на них необходимо осуществить. Отразить необходимое на рисунке и структурной схеме.

4.2.3. Определить, за счет чего можно осуществить необходимые изменения и (или) воздействия. В частности, за счет каких изменений конфигурации ТС: а) какие элементы ТС, их окружения или внешней среды можно привлечь; б) какие элементы нужно ввести; в) как изменить связи между элементами в пространстве и во времени. Отразить необходимые изменения на структурной схеме.

4.2.4. Сформулировать физическое решение, уточнив при этом конфигурацию ТС. Перейти к шагу 4.4.

4.3. Сформулировать техническое решение (способ, реализующий физическое решение). Указать конкретные технические средства (конструктивные элементы, узлы, операции, вещества, режимы). Описать полученную ТС (или ее часть), отразив ее конфигурацию (состав и связи).

Этап 5. Оценка показателей и формулирование решения

5.1. Выполнить оценку количественных показателей ТС. Если на шаге 1.7 определены количественные показатели, выполнить количественный анализ ТС и выявить, в чем полученные показатели хуже требуемых. Если ухудшение выявлено, проверить возможность достижения требуемых показателей за счет параметрической оптимизации ТС. Если оптимизация не дает результатов, выявить противоречия, обострение которых не позволяет получить

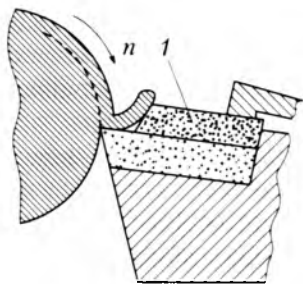


Рис. 1.99. Стружколом

требуемые количественные показатели, и разрешить их, видоизменив ТС. Повторить количественный анализ.

5.2. Сформулировать полученное решение с учетом произведенных изменений. Описать полученную ТС. Разработать схему полученного устройства и (или) процесса (способа). Для уяснения сути научно-технического поиска ниже приведены примеры поисковых задач.

Задача 1. Известен способ дробления стружки при помощи накладных стружколомов 1 (рис. 1.99). Но при этом значительно увеличивается мощность резания (увеличивается сила P_z). Как обеспечить ломание стружки без повышения мощности резания?

Задача 2. При сверлении отверстий в заготовках из вязкопластичного материала на сверлильных и агрегатных станках получают две длинные спиральные стружки (рис. 1.100), которые загромождают рабочее пространство и могут представлять опасность для оператора, так как вращаются вместе со сверлом. Как обеспечить дробление стружки, особенно при многошпиндельной обработке?

Задача 3. На сверлильном станке необходимо обрабатывать некоторый ассортимент сферических углублений, радиус которых изменяется в заданных пределах. Обработка ведется зенковкой с круговыми режущими кромками (рис. 1.101), радиус которых

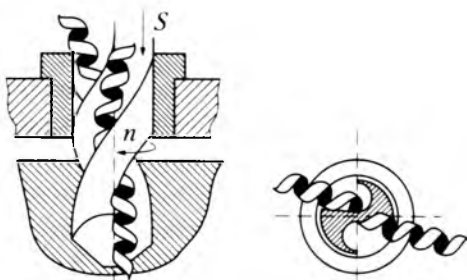


Рис. 1.100. Схема сверления вязкопластичного материала.

равен требуемому радиусу R скругления. Как сократить требуемый ассортимент инструментов?

Задача 4. Для предварительной обработки (под шлифование) торондательных беговых дорожек наружных колец шарикоподшипников на токарном автомате применяется способ, при котором фасонному резцу сообщают круговую подачу S (рис. 1.102). Но при обработке беговых дорожек относительно большого радиуса возникает значительная сила резания и приходится уменьшать подачу. Вследствие этого процесс резания становится неустойчивым (возникают автоколебания). Кроме того, для обработки определенного ассортимента колец требуется соответствующий ассортимент фасонных резцов. Требуется разработать способ обработки беговых дорожек наружных колец подшипников, лишенный указанных недостатков.

Задача 5. Технологические канавки (для выхода шлифовального круга) в наружных кольцах роликоподшипников растачиваются на токарном автомате в два перехода (рис. 1.103). Недостатком этого способа являются относительно большие затраты времени

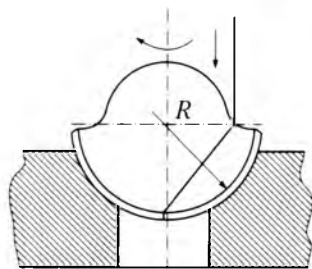


Рис. 1.101. Схема обработки на сверлильном станке сферического углубления радиусом R специальным инструментом

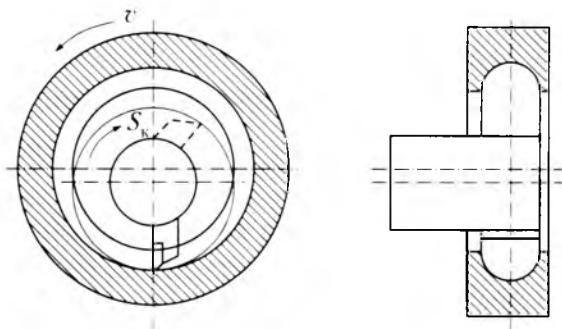


Рис. 1.102. Схема процесса обработки беговых дорожек на кольцах подшипников

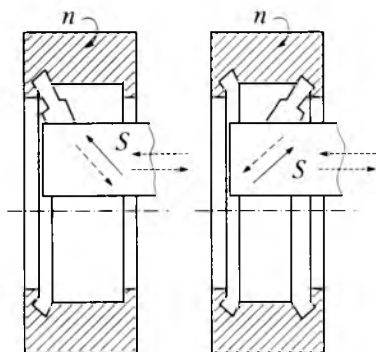


Рис. 1.103. Схема растачивания канавок

на холостые перемещения (ввод державки в исходное для рабочей подачи положение и ее вывод). Как сократить потери времени?

Задача 6. Известен способ шлифования резьбы метчиков однониточным кругом, когда заборная (конусная) часть шлифуется по контуру одновременно с калибрующей частью. Недостатком такого способа является погрешность шага резьбы на заборном конусе (рис. 1.104). Как устранить указанный недостаток?

Задача 7. Известен способ обработки торцовых выточек без отверстия в центре (рис. 1.105), при котором заготовка вращается, а резцу сообщают радиальную подачу S . Недостаток данного способа в том, что скорость резания изменяется по радиусу заготовки и на ее оси равна нулю, что приводит к ухудшению параметров шероховатости от периферии к центру. Как устранить указанный недостаток?

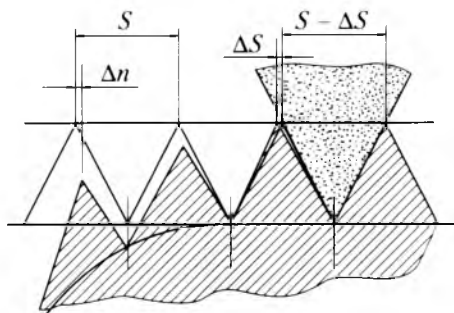


Рис. 1.104. Схема шлифования метчика

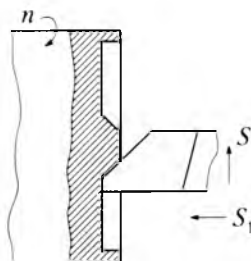


Рис. 1.105. Схема обработки торцовой выточки

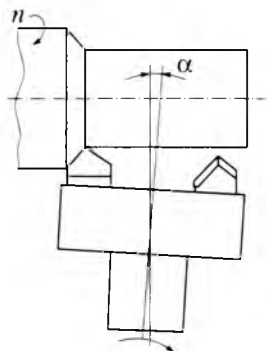


Рис. 1.106. Схема фрезерования вала

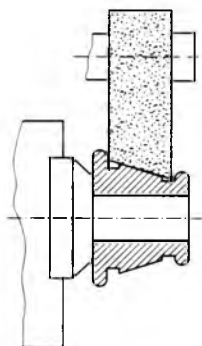


Рис. 1.107. Шлифование конической поверхности

Задача 8. Известны способы обработки поверхностей тел вращения торцевыми фрезами, при которых фрезу устанавливают под углом к направлению ее перемещения (рис. 1.106). Недостаток указанного способа — низкая производительность. Как можно ее повысить?

Задача 9. Известен способ шлифования конических поверхностей периферией дискового круга, правленного на заданный угол, ось вращения которого параллельна оси детали (рис. 1.107). Недостатком этого способа является то, что он не может обеспечить высокую точность обработки, так как происходит неравномерный износ рабочей поверхности круга, связанный с разностью линейных скоростей шлифования по ширине круга. Как устранить указанный недостаток?

1.7. Примеры улучшения качества и свойств деталей



1.7.1. Повышение качества деталей использованием технологической наследственности

Технологическая наследственность — это явление переноса свойств обрабатываемой заготовки от предшествующих операций к последующим, которое в конечном счете сказывается на качестве

и эксплуатационных свойствах деталей машин и приборов [22]. Ранее среди машиностроителей преобладало мнение, что качество деталей определяется в основном режимами и условиями конечной операции их обработки (за исключением частичного копирования погрешностей формы деталей на некоторых операциях). Однако проведенные А.М. Датьским, Э.В. Рыжовым, П.И. Ящерицыным и другими учеными исследования показали, что многие характеристики качества деталей машин формируются не только на финишной, но и на промежуточных операциях их изготовления.

В качестве примера ниже приведены результаты исследований влияния технологии обработки образцов из стали ШХ15 на контактную прочность [13]. Исследовались четыре группы образцов, изготовленных из одного прутка. Механическая обработка образцов перед закалкой была различной: I группа — грубая токарная обработка с R_z 80 мкм; II и III группы — токарная обработка с R_z 20 мкм; IV группа — шлифование до R_z 0,32 мкм. После указанной обработки все образцы в одинаковых условиях прошли закалку до твердости 61,5...62 HRC. Затем закаленные образцы шлифовались до получения конечной шероховатости с Ra 0,16 мкм и испытывались на машине трения МИ в течение принятого для всех образцов времени обкатки в паре с дисками твердостью 63...64 HRC.

Эксперименты показали, что большее количество усталостных выкрашиваний при одной и той же продолжительности обкатки имеет место на образцах, подвергнутых до закалки грубой токарной обработке (I группа образцов). Для образцов II и III групп количество усталостных выкрашиваний было существенно меньше, равно как и размер каждой усталостной раковины. На образцах, которые до закалки были прошлифованы, выкрашивания отсутствовали вообще.

При одинаковой конечной шероховатости поверхности образцов их физические и эксплуатационные свойства оказались различными. Это можно объяснить таким образом. При шлифовании грубо обточенных поверхностей в месте расположения выступов микронеровностей в момент их срезания шлифовальным кругом возникают местные тепловые удары, что приводит к изменению структуры металла под этими выступами. Во впадинах металл нагревается меньше, следовательно, здесь его структура иная.

Поскольку на поверхности выступы и впадины чередуются, то после срезания такого рельефа подповерхностный слой становится структурно неоднородным. Значит, имеют место структурные концентраторы напряжений, что приводит к образованию микротрещин, которые обычно обуславливают начало усталостного выкрашивания. Чем больше исходная высота микронеровностей, тем контрастнее становится структурная неоднородность шлифованной поверхности и тем выше вероятность возникновения микротрещин.

Описанная ситуация является примером «косвенного» наследования, т.е. перехода одного отрицательного свойства поверхности (большая высота микронеровностей) в качественно иное, хоть и тоже отрицательное свойство подповерхностного слоя металла (структурная неоднородность). Может быть и «прямое» наследование, когда происходит пооперационная передача одной и той же характеристики качества. Примером такого вида наследования является геометрическое копирование исходной погрешности формы детали. Если, например, на предыдущей операции заготовка имела овальность, то и на последующей операции она сохранится, хотя и уменьшится.

Чаще имеет место наследование отрицательных характеристик исходной заготовки (погрешностей формы, шероховатости и др.). Однако могут наследоваться и положительные характеристики, которые стремятся сохранить, донести до готовой детали. Например, если после термообработки подповерхностный слой заготовки приобрел повышенную твердость, равномерную мелкозернистую структуру, то эти качества необходимо сохранить в детали. С учетом этого необходимо выбирать методы и условия обработки.

Различные показатели качества характеризуются различной продолжительностью пооперационного наследования при изготовлении деталей, различной «проникающей способностью». Одни сохраняются вплоть до самой последней операции, другие «угасают» значительно раньше. Например, дефекты металла в виде трещинок — волосовин, неметаллических включений (сульфидов, оксидов и др.), внутренних пустот (раковин, пористости), возникшие при выполнении кузнечно-штамповочных операций, остаются в заготовке на всех операциях и переходят в готовое изделие. А такие характеристики, как волнистость и огранка поверхности, способны «пройти вперед», т.е. могут частично копироваться на одной-двух

смежных операциях. Затем их влияние прекращается. Указанная «проникающая способность» характеристик качества зависит от многих факторов и прежде всего от их природы, методов и условий обработки заготовки, ее материала.

В технологической цепочке существуют как бы своего рода «барьеры» [22]. Некоторые характеристики качества преодолеть эти «барьеры» не могут и в таком случае не влияют на конечные свойства изготовленных деталей. Другие факторы такие «барьеры» проходят, но при этом значительно теряют свою исходную силу и сказываются на конечных свойствах деталей очень слабо. Наиболее существенными «барьерами» являются термические операции (закалка, отпуск, отжиг, нормализация) и операции, связанные с поверхностным пластическим деформированием (ППД) материала деталей.

Процессом технологического наследования следует управлять, с тем чтобы свойства деталей, положительно влияющие на их эксплуатационные характеристики, сохранялись в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно, ликвидировались по возможности в его начале.

В связи с этим в существующих методиках расчета межоперационных припусков и допусков на обработку, выбора режимов обработки, построения технологического процесса желательно учитывать действие факторов технологической наследственности с целью повышения качества изготовленных деталей. Пути решения этой задачи рассмотрены ниже.

Математическое моделирование технологического процесса с учетом технологической наследственности имеет свои особенности. После определения оптимальной структуры технологического процесса возникает задача выбора рациональных условий выполнения всех операций технологического процесса: режимов обработки, характеристик элементов технической системы, значений межоперационных припусков и допусков. Выбор этих условий как раз и производится с помощью математического моделирования ТП с учетом явлений технологической наследственности. Подробно эти вопросы рассмотрены в источнике [22] и других работах.

Технологической цепью называют ряд последовательных операций, которые совершаются над изделием для получения с необходимой точностью различных характеристик его качества.

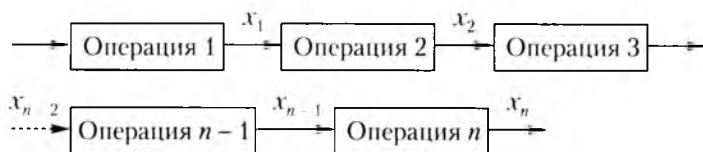


Рис. 1.108. Технологическая цепь

На рис. 1.108 показана технологическая цепь, включающая n операций. Характеристика качества, достигнутая после некоторой i -й операции, обозначается обычно y_i , а исходное значение этой характеристики перед i -й операцией — x_i . Для любой операции технологической цепи справедливо равенство $y_{i-1} = x_i$, т.е. характеристика качества заготовки, достигнутая на предыдущей операции, является входной характеристикой качества для последующей операции. Ниже анализ технологических цепей будет рассматриваться применительно к одной характеристике качества — точности обработки (предложенные методы можно распространить и на другие характеристики качества, поддающиеся количественной оценке).

Анализ технологических цепей позволяет определить зависимость между погрешностями обработки, возникающими на различных операциях всего технологического процесса, степень влияния отдельных операций на точность готового изделия, рациональные требования к точности обработки на промежуточных операциях, а также уточнить структуру процесса в целом и выполнить прогнозирование достижимой точности обработки при изменении точности на любой операции. Анализ технологической цепи обычно проводится пооперационно, начиная с первой операции.

Для сбора экспериментальных данных производятся измерения исследуемого параметра в трех или четырех партиях заготовок до и после изучаемой операции. При этом необходимо обеспечить сопоставимость результатов измерений, т.е. проводить их для всех заготовок в одинаковых условиях. Требования к объему выборки и точности измерений приведены в § 1.1.

Корреляционно-регрессионный анализ эффективен при соблюдении ряда предпосылок. Поэтому анализ экспериментальных данных следует начинать с проверки соблюдения этих предпосылок по методике, описанной в п. 1.2.1. При положительном результате этой проверки необходимо установить наличие и произвести пред-

варительную оценку характера взаимосвязи $y = f(x)$ по эмпирической линии регрессии, показанной на рис. 1.109. Каждая точка корреляционного поля соответствует отдельной заготовке в партии и имеет координаты x_i и y_i , равные параметру точности этой детали до и после обработки на данной операции. Для получения координат опорных точек 1, 2, 3 эмпирической линии регрессии весь диапазон значений x или y разбивается на 3–5 зон, и в каждой зоне определяются величины $\bar{x}$ и $\bar{y}$, которые и будут координатами указанных точек. Если эмпирическую линию регрессии при визуальном анализе можно заменить прямой, следует рассчитать значение коэффициента парной корреляции и оценить его достоверность по формулам, приведенным в п. 1.2.3. Если коэффициент r_{xy} окажется значимым, можно перейти к расчету коэффициентов уравнения

$$\bar{y} = a + b\bar{x}, \quad (1.74)$$

где a — собственная погрешность обработки на данной операции, зависящая от режимов и условий функционирования на данной операции и не зависящая от входной погрешности; $b\bar{x}$ — наследственная погрешность, показывающая, какая часть погрешности обработки заготовки на предыдущей операции (или погрешность заготовки) переносится на полуфабрикат, обработанный на данной операции.

Методики расчета коэффициентов уравнения (1.74) и оценки их значимости, а также определения адекватности уравнения регрессии в целом приведены в § 1.2, а также в работах Я.Д. Колкера, А.К. Митропольского, Е.И. Пустыльника и др.

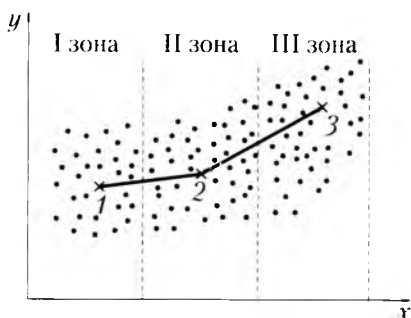


Рис. 1.109. Корреляционное поле и эмпирическая линия регрессии (1, 2, 3 — опорные точки)

Если коэффициент r_{xy} окажется незначимым, следует рассчитать эмпирическое корреляционное отношение η_z и оценить его достоверность. Если величина η_z также незначима, можно считать, что между x и y отсутствует взаимосвязь и данная операция является «барьером» на пути наследования изучаемого показателя точности. В случае же значимости величины η_z необходимо подобрать кривую, в наилучшей степени описывающую изучаемую функцию $y = f(x)$. Для выбранной криволинейной зависимости следует рассчитать теоретическое корреляционное отношение η_T и сопоставить его с величиной η_z . Если расхождение между их значениями незначительно, можно считать, что выбранная кривая достаточно точно описывает изучаемый процесс. Методы расчетов значений η_z и η_T , оценки их достоверности приведены в работах указанных выше авторов. Окончательный вывод о применимости того или иного уравнения регрессии для описания изучаемого процесса следует делать после оценки адекватности его с помощью критерия Фишера (табл. 1.6).

Исследования показывают, что во многих случаях процесс пооперационного изменения параметров качества деталей машин носит линейный характер. Поэтому методика дальнейшего анализа технологических цепей исходит из предположения о линейном характере зависимости $y = f(x)$, описываемой уравнением (1.74).

Анализируя наследственную погрешность $b\bar{x}$, можно отметить ряд частных случаев функционирования технологического процесса [22]. Если $b = 0$, то входная погрешность полностью исправляется и точность заготовки, обработанной на данной операции, определяется только собственной погрешностью обработки a на данной операции. Если $b = 1$, входная погрешность не исправляется. Более того, к ней добавляется собственная погрешность обработки на данной операции, из-за чего ее точность ниже, чем на предыдущей операции. При $0 < b < 1$ входная погрешность частично исправляется. Чем меньше b , тем меньше наследуемая погрешность $b\bar{x}$ и тем больше действие данной операции. При этом ее собственная погрешность a должна быть такой, чтобы удовлетворялось условие $a < (1 - b)\bar{x}$, где $\bar{x}$ — среднее арифметическое значение входной погрешности. В этом случае точность обработки на данной операции будет выше, чем на предыдущей. Если $b > 1$, погрешность переносится с усилением (наследуемая погрешность

больше входной погрешности). Такое положение возможно, например, при выполнении термической обработки. Случай $b < 0$ соответствует свёрхисправлению погрешности предыдущей обработки. На практике такие случаи маловероятны.

Коэффициент b в уравнении (1.74) носит название **коэффициента переноса**, а величина $1 - b$ — **коэффициента исправления**.

Собственная погрешность обработки на данной операции для данных условий функционирования технологического процесса остается относительно постоянной (возможен ее случайный разброс за счет действия различного рода случайных факторов) и, следовательно, может быть отнесена к систематическим погрешностям. Для повышения точности обработки необходимо стремиться к уменьшению значения a за счет корректирования уровня настройки технологического процесса. Однако если показателями качества являются существенно положительные величины (эксцентриситет, биение, коробление и т.д.), собственная погрешность a не может быть уменьшена за счет изменения уровня настройки процесса. В этих случаях погрешность a является дефектом и для ее уменьшения необходимо усовершенствовать операции.

Зависимость (1.74) отображает процесс формирования погрешности обработки на данной операции в ее взаимосвязи с предыдущей операцией. Поэтому она является моделью процесса технологического наследования погрешности обработки для данной операции и справедлива при сохранении условий выполнения данной операции (не зависит от набора значений x , т.е. от точности обработки, достижимой на предыдущей операции). Этого нельзя сказать о коэффициенте уточнения $\epsilon = \bar{x}/\bar{y}$, значение которого не остается постоянным для данной операции, а зависит от набора исходных значений погрешностей обработки.

При наличии линейной корреляционной связи между выходной и входной погрешностями дисперсия выходной погрешности обработки

$$S_y^2 = b^2 S_x^2 + S_{yx}^2, \quad (1.75)$$

где S_y^2 , S_x^2 — дисперсии соответственно выходной и входной погрешностей; S_{yx}^2 — дисперсия собственной погрешности обработки на данной операции.

Первое слагаемое в выражении (1.75) представляет часть величины S_y^2 , унаследованную от предыдущей операции. Поэтому величина $A = \frac{S_{yx}^2}{S_y^2}$ характеризует долю S_y^2 , возникшей на данной операции, а величина $B = b^2 S_x^2 / S_y^2$ — долю перенесенной с предыдущей операции. Подставив в уравнение (1.75) значение коэффициента $b = \frac{r_{xy} S_y}{S_x}$, после преобразований получим

$$S_{yx}^2 = S_y^2 (1 - r_{xy}^2). \quad (1.76)$$

Уравнение (1.75) служит в основном для определения межоперационного допуска T_x на параметр точности детали, обработанной на предыдущей операции, если задан допуск T_y на этот же параметр заготовки, обрабатываемой на данной операции.

Если рассеивание погрешностей обработки подчиняется закону нормального распределения, то в соответствии с табл. 1.27

$$\omega_x = 2lS_x = T_x, \quad \omega_y = 2lS_y = T_y. \quad (1.77)$$

Подставив значения S_x и S_y , полученные из уравнений (1.77), в выражение (1.75), после преобразований получим

$$T_x = \frac{\sqrt{T_y^2 - 4l^2 S_{yx}^2}}{b}, \quad (1.78)$$

где l — коэффициент, который выбирается из табл. 1.28 в зависимости от объема выборки.

Пример [13]. Требуется установить допуск T_x на коробление заготовок поршневых колец, если известно, что допуск на коробление готовых поршневых колец $T_y = 50$ мкм.

По данным измерения коробления 100 поршневых колец до и после обработки установлена следующая зависимость между входной и выходной погрешностями: $\bar{y} = 0.21\bar{x} + 25$; $S_y = 7$ мкм; $r_{xy} = 0.454$.

По формуле (1.76) определим дисперсию собственной погрешности обработки:

$$S_{yx}^2 = 7^2 (1 - 0.454^2) = 38.9 \text{ мкм}^2.$$

По табл. 1.28 для $N = 100$ получим $l = 3.6$. По формуле (1.78) вычислим допуск на коробление заготовок:

$$T_x = \frac{\sqrt{50^2 - 4 \cdot 3.6^2 \cdot 38.9}}{0.21} = 104 \text{ мкм}.$$

Если в результате анализа технологической цепи, включающей n операций, получено n уравнений связи между входной и выходной погрешностями, среднее арифметическое значение $\bar{y}_n$ для n -й операции определяют по формуле

$$\bar{y}_n = \left[\prod_{i=1}^n b_i \right] \bar{x}_1 + \left[\prod_{i=2}^n b_i \right] a_1 + \left[\prod_{i=3}^n b_i \right] a_2 + \dots + a_n, \quad (1.79)$$

где $\bar{x}_1$ — среднее арифметическое значение входной погрешности обработки на 1-й операции.

Пример [13]. Изучается технологический процесс изготовления поршневых колец с точки зрения обеспечения допустимого значения их коробления. Технологическая цепь состоит из семи операций. Результаты экспериментов сведены в табл. 1.48. Характеристики коробления заготовки: $\bar{x}_3 = 0,28$ мм, $S_j = 0,122$ мм.

Таблица 1.48

Результаты экспериментов по короблению поршневых колец

Операция	Уравнение связи	r_{xy}	S_y	$\bar{Y}$
Отделочное шлифование	$\bar{Y}_{x1} = 0,615\bar{x}_1 + 0,037$	0.874	0.106	0.209
Искусственное старение	$\bar{Y}_{x2} = 0,387\bar{x}_2 + 0,024$	0.608	0.048	0.105
Шлифование торцов	$\bar{Y}_{x3} = 0,45\bar{x}_3 + 0,044$	0.674	0.053	0.091
Черновые одновременные обтачивание и растачивание	$\bar{Y}_{x4} = 0,82\bar{x}_4 + 0,014$	0.869	0.047	0.089
Вырезка замка	$\bar{Y}_{x5} = 0,365\bar{x}_5 + 0,043$	0.684	0.043	0.075
Чистовые одновременные обтачивание и растачивание	$\bar{Y}_{x6} = 0,280\bar{x}_6 + 0,054$	0.584	0.038	0.075
Растачивание канавки	$\bar{Y}_{x7} = 0,525\bar{x}_7 + 0,042$	0.554	0.036	0.081

На рис. 1.110 приведен график изменения среднего арифметического значения, а на рис. 1.111 — график изменения среднего квадратического отклонения коробления поршневых колец по ходу технологического процесса (нуль на оси абсцисс соответствует характеристике коробления заготовок колец).

Анализ данных табл. 1.48 и графиков на рис. 1.110 и 1.111 позволяет сделать следующие выводы:

- коробление поршневых колец возникает на литейной операции и уменьшается по ходу технологического процесса. Незначительное увеличение коробления на 7-й операции объясняется уменьшением жесткости поршневого кольца в результате растачивания торсионной канавки,

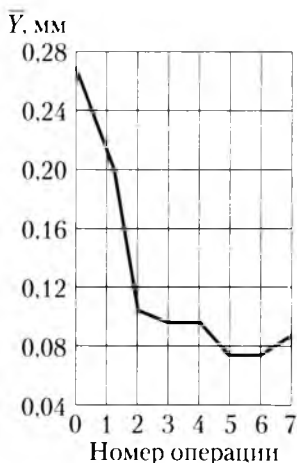


Рис. 1.110. График изменения среднего арифметического значения коробления колец по ходу технологического процесса

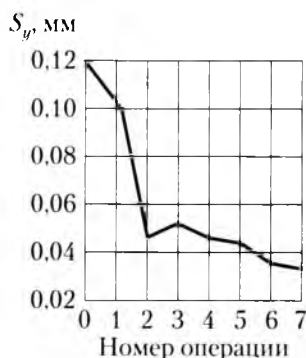


Рис. 1.111. График изменения среднего квадратического отклонения коробления колец по ходу технологического процесса

увеличение рассеивания характеристик коробления на 3-й операции — значительными колебаниями силового и теплового полей, приводящими к появлению в заготовках остаточных напряжений различного знака:

- на каждой операции технологической цепи уменьшается коробление поршневых колец вследствие уточнения их геометрической формы, но одновременно и увеличивается в результате наведения остаточных напряжений; увеличение коробления определяется свободным членом уравнения регрессии;

- операция шлифования обладает значительной исправляющей способностью. Но в связи с тем что на данной операции возникают существенные собственные погрешности обработки ($a = 0,044$ мм), общее снижение коробления после данной операции незначительно.

В результате анализа технологической цепи можно рекомендовать обратить особое внимание на операцию шлифования торцов. Углубленный анализ этой операции поможет выявить причины, приводящие к появлению столь высоких собственных погрешностей, и выработать мероприятия по их снижению.

В соответствии с уравнением (1.79) зависимость между погрешностями заготовок и готовых поршневых колец имеет вид:

$$\bar{y}_7 = (0,615 \cdot 0,387 \cdot 0,45 \cdot 0,82 \cdot 0,365 \cdot 0,28 \cdot 0,525) \cdot \bar{x}_1 +$$

$$\begin{aligned}
 &+ (0,387 \cdot 0,45 \cdot 0,82 \cdot 0,365 \cdot 0,28 \cdot 0,525) \cdot 0,037 + \\
 &+ (0,45 \cdot 0,82 \cdot 0,365 \cdot 0,28 \cdot 0,525) \cdot 0,024 + \\
 &+ (0,82 \cdot 0,365 \cdot 0,28 \cdot 0,525) \cdot 0,044 + \\
 &+ (0,365 \cdot 0,28 \cdot 0,525) \cdot 0,014 + (0,28 \cdot 0,525) \cdot 0,043 + \\
 &+ 0,525 \cdot 0,054 + 0,042 = 0,0047 \bar{x}_1 + 0,08.
 \end{aligned}$$

Анализируя полученное уравнение, можно сделать вывод, что исследуемая технологическая цепь обладает большой исправляющей способностью и погрешность готовых поршневых колец в основном определяется собственными погрешностями, возникающими на каждой операции цепи. Задачи технолога — установить причины этих погрешностей и осуществить мероприятия по их снижению.

С помощью уравнения (1.79), можно определять оптимальное число n проходов на данной операции для получения определенной точности готовой детали. В связи с тем что все проходы выполняются в одних и тех же условиях, коэффициенты b и a в уравнении регрессии остаются постоянными для различных проходов. В этом случае уравнение (1.79) примет вид

$$\bar{y}_n = b^n \bar{x}_1 + b^{n-1} a + b^{n-2} a + \dots + a.$$

После преобразований имеем

$$n = \{ \lg(\bar{y}_n - a) - \lg[\bar{x}_1 - a/(1 - b)] \} / \lg b. \quad (1.80)$$

Из формулы (1.80) следует, что на данной операции погрешность заготовки исправляется за один или несколько проходов только при условии

$$\bar{x}_1 - \bar{y}_n > \frac{ab}{1 - b}. \quad (1.81)$$

Пример [13]. На токарно-винторезном станке обрабатывается партия валиков, точность которых после обработки должна соответствовать $\bar{y} = 0,05$ мм. Средняя погрешность заготовок $\bar{x}_1 = 0,25$ мм. Предварительными исследованиями установлено, что входная и выходная погрешности при выполнении каждого прохода связаны уравнением $\bar{y}_1 = 0,6\bar{x} + 0,02$. Необходимо определить число проходов для достижения заданной точности обработки.

Проверяем условие (1.81):

$$0,25 - 0,05 > \frac{0,02 \cdot 0,6}{1 - 0,6}, \quad \text{т.е.} \quad 0,2 > 0,03.$$

ниях данная задача может быть решена методами динамического программирования.

Используется также метод многоуровневого итерационного проектирования технологического процесса. Процесс проектирования разделяется на ряд различных по детализации уровней, а на каждом уровне — на несколько более простых подзадач. Решения подзадач одного и разных уровней оптимизируются одновременно.

В качестве оценочной функции обычно используется себестоимость технологической операции. Однако в ряде случаев целесообразно применять в качестве критерия оптимальности функциональную зависимость наиболее существенного эксплуатационного свойства детали от технологических факторов ее изготовления.

Полученные математические зависимости между отдельными параметрами качества на различных операциях могут быть использованы для получения многомерной математической модели технологического процесса изготовления детали [22]. Использование таких моделей для оптимизации различных параметров технологических процессов особенно перспективно при автоматизации проектирования с помощью ЭВМ.

1.7.2. Упрочнение материалов деталей плазменной металлизацией

Процесс газотермического нанесения покрытий на рабочие поверхности деталей машин позволяет создавать в зависимости от материалов и технологии металлизации (напыления) слои с определенными наперед заданными свойствами. В результате этого повышаются износостойкость, стойкость против коррозии, эрозии, кавитации и другие эксплуатационные свойства деталей машин.

Сущность процесса состоит в нанесении на поверхность детали металла или другого материала в расплавленном состоянии, распыляемого струей газа. В зависимости от источника теплоты, используемой для расплавления напыляемого материала в распылителях (металлизаторах), различают плазменную, газопламенную, электродуговую, детонационную и другие способы металлизации. Материал, подлежащий напылению, поступает в зону обработки в виде порошка или проволоки. В настоящее время для увеличения износостойкости деталей за счет плазменного и газопламенного

напыления с последующим оплавлением применяются самофлюсующиеся твердые сплавы на основе никеля и хрома, легированные бором и кремнием (сплавы типа СНГН, ВСНГН, ПГ, ПН и др.) [13].

Перед напылением поверхности заготовки подвергают специальной обработке для придания им требуемой шероховатости с целью создания условий для прочного сцепления (адгезии) напыленного слоя с материалом детали. Чаще всего для этого применяют обезжиривание, травление, пескоструйную и дробеструйную обработки, нарезку рваной резьбы, анодно-механическую обработку и др. Прочность сцепления (адгезии) основного металла и напыленного слоя ниже, чем при наплавке, и зависит от предварительной подготовки поверхности. При пескоструйной подготовке поверхности прочность сцепления составляет 10...60 МПа. Улучшение свойств покрытия и прочности сцепления наблюдается при напылении в защитной среде и при использовании для дутья инертного газа.

Толщина напыленного слоя определяется значением износа, припуском на механическую обработку и условиями работы детали. Для деталей, работающих на истирание, она не должна превышать 1...1,5 мм.

Как показали исследования, выполненные на кафедре «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета, нанесение на рабочие поверхности деталей автомобилей, тракторов, нефтяного оборудования и других машин тонких слоев самофлюсующихся сплавов или композиционных порошков позволяет повысить износостойкость деталей в 2–3 раза по сравнению с закаленной сталью 45.

Нанесенный слой обладает также высокими антифрикционными свойствами, что связано с пористостью покрытия. Нанесение антифрикционных сплавов напылением позволяет экономить до 80 % цветных металлов, расходуемых на изготовление подшипников скольжения.

Часто напыление применяют для защиты деталей машин и конструкций от коррозии. В этом случае в качестве напыляемых материалов применяются цинк, алюминий, свинец и другие металлы.

К преимуществам напыленных покрытий следует отнести высокую плотность, сравнительно малый расход напыляемого материала

по сравнению с другими методами (наплавкой, сваркой и др.), меньшую степень микрогеометрии поверхности.

Основные недостатки способа металлизации — хрупкость нанесенного слоя и не всегда достаточная прочность его сцепления с металлом заготовки, снижение механической прочности и особенно предела выносливости деталей в результате уменьшения размеров при подготовке поверхности деталей. Чтобы избежать появления трещин в напыленном слое и добиться лучшего сцепления его с основным материалом, стремятся снизить остаточные напряжения в слое. Недостатком процесса является также трудность последующей механической обработки нанесенных с его помощью покрытий на поверхности деталей машин.

Если ранее процессы металлизации использовались в основном при ремонте машин, то в последнее время они начинают применяться и для увеличения долговечности деталей, лимитирующих ресурс узлов или машины в целом, при их изготовлении.

При плазменной металлизации используется плазменная струя, представляющая собой поток ионизированных частиц газа, обладающих большим запасом энергии.

При свободном горении электрической дуги температура на ее оси достигает 6000...8000 °С. Если принудительно сжать дугу, можно значительно повысить температуру, что и используется для получения плазменной струи. Пропуская дугу совместно с защитным газом (водород, азот, аргон) через охлаждаемое водой сопло, сжимают ее и достигают ионизации потока газа. При этом температура ионизированного потока газов (плазмы) достигает 50 000 °С.

Плазма — смесь молекул, атомов, ионов, электронов и других частиц. Электропроводимость и магнитные эффекты в плазме — результат ее квазинейтральности. Истечение плазмы из сопла горелки происходит со сверхзвуковыми скоростями — 3000...6000 м/с. Скорость полета частиц на расстояние 100 мм от сопла — в пределах 70...155 м/с для различных порошков.

При плазменной наплавке деталь выполняет функции анода, при плазменной металлизации она нейтральна. Плазменными горелками можно расплавлять и напылять на поверхность материалы в виде порошка (рис. 1.112) или проволоки (прутка) (рис. 1.113).

Характерной является установка УМП-6, предназначенная для напыления различных порошковых (из твердых сплавов,

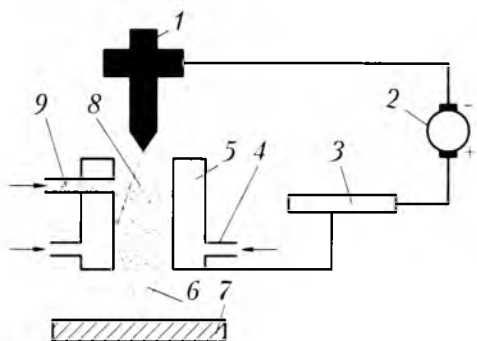


Рис. 1.112. Схема плазменного напыления порошковыми материалами: 1 – электрод; 2 – источник питания; 3 – регулируемое сопротивление; 4 – охлаждающая вода; 5 – плазменная головка (плазмотрон); 6 – плазменный факел; 7 – деталь (заготовка); 8 – дуга; 9 – порошок твердого сплава

вольфрама, двуокиси циркония, окиси алюминия, карбидов, нитридов, силицидов и других соединений тугоплавких материалов), проволочных, прутковых материалов, а также для наплавки, сварки, пайки, термообработки, нагрева заготовок под ковку и пр.

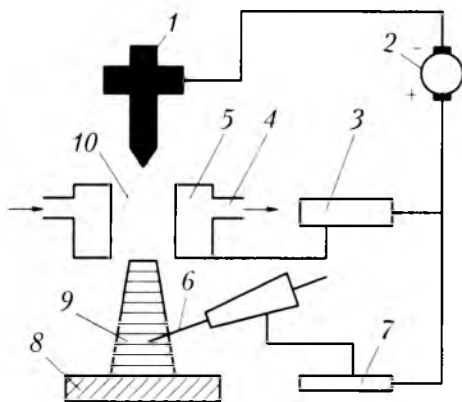


Рис. 1.113. Схема плазменного напыления проволочными (прутковыми) материалами:

1 – электрод; 2 – источник питания; 3 – регулируемое сопротивление; 4 – охлаждающая вода; 5 – плазменная головка (плазмотрон); 6 – проволока (пруток); 7 – регулируемое сопротивление; 8 – заготовка; 9 – факел плазмы; 10 – дуга

В установке электрическая дуга, возникающая между вольфрамовым катодом и медным соплом — анодом, нагревает подаваемый в горелку газ до температуры образования плазмы. В поток нагретого газа непрерывно подается с помощью транспортирующего газа напыляемый материал из питательного бачка. В качестве плазмообразующего газа используют чаще азот, а также аргон, водород, гелий и их смеси. Охлаждение горелки производится водой. Производительность распыления самофлюсующихся сплавов — до 7 кг/ч.

Для порошка из самофлюсующихся сплавов рациональными являются режимы с характеристиками: $Q_{\text{тг}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{гг}} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, сила тока $I = 350 \text{ А}$, напряжение $U = 30 \text{ В}$, мощность $W = 10,5 \text{ кВт}$. Приведенные данные можно принять за основу при проведении напыления сплавами плотностью около $8 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^3$ с частицами сферической формы размером от 30 до 150 мкм [13].

Расстояние l от напыляющей горелки до напыляемой поверхности оказывает также существенное влияние на расход порошка и сцепление покрытия с основным металлом. При увеличении значения l до 200 мм сцепление слоя с основным металлом возрастает, а при дальнейшем росте — уменьшается. Для самофлюсующихся сплавов обычно $l = 150...180 \text{ мм}$. Сцепление увеличивается также при увеличении силы тока и уменьшении расхода плазмообразующего газа.

С помощью плазменного напыления можно наносить все известные тугоплавкие металлы и сплавы при высоком качестве покрытий и КПД процесса (до 80 %).

Ближайшая перспектива развития аппаратуры для плазменного нанесения покрытий связана с производством полуавтоматических станков 15В-Б, встраиваемых в механизированные линии, и установок УМП-7, УПУ-7, УПУ-8 для плазменного напыления. В механизированные линии, помимо полуавтомата для плазменного напыления, входит также полуавтоматическое оборудование для обезжиривания и абразивно-струйной обработки заготовок перед напылением, оплавления нанесенных покрытий, а также для восстановления неиспользованного порошкового материала. Все установки связаны между собой подъемно-транспортными средствами.

Полуавтомат 15В-Б позволяет напылять покрытия на плоские и цилиндрические поверхности. Он может быть рекомендован для

мелкосерийного и ремонтного производств с широким ассортиментом напыляемых деталей, а также использован в составе механизированного комплекса. В комплект полуавтомата входят: камера напыления, манипулятор для перемещения плазмотрона по двум взаимно перпендикулярным координатам, вращатель заготовки с горизонтальной осью вращения, установка для плазменного напыления и наплавки УМП-6, комплекс устройств, способствующих охране окружающей среды, для управления работой полуавтомата и комплект оснастки.

Развитие процессов напыления идет по следующим направлениям:

- автоматизация процесса, в частности, путем создания блочно-модульных манипуляторных систем, управляемых с помощью микропроцессоров;

- совершенствование плазмотронов путем повышения их мощности (от 50 до 160...200 кВт), создания ламинарного (спокойного) потока на выходе из плазмотрона, инъекции порошка в плазму с отбором транспортирующего газа и другими методами. Эти мероприятия позволяют повысить качество покрытий, производительность процессов нанесения покрытий (по оксиду алюминия до 15...20 кг/ч), использовать более дешевые плазмообразующие средства — воду, воздух, природный газ;

- совершенствование методов нанесения покрытий за счет напыления сверхзвуковыми плазмотронами в камерах с разреженной атмосферой (это позволяет получать покрытия с пористостью менее 1 % и прочностью сцепления более 50...70 МПа), а также за счет нанесения сложных многослойных покрытий с заранее заданными свойствами и т.д.

1.7.3. Упрочнение материалов деталей газопламенной металлизацией

Газопламенная металлизация основана на расплавлении напыляемого материала в струе горящих газов и нанесении частиц такого металла на поверхности деталей или конструкций. Напыляемый материал может поступать в зону расплавления в виде порошка (чаще всего) или проволоки.

В газопламенных установках используется в основном пламя при горении ацетиленокислородной смеси. Оно имеет характеристики лучшие, чем у других смесей (температура 3200°C , скорость горения $7\ldots 13,5 \text{ м}^3/\text{с}$, удельная тепловая мощность около $44,9 \cdot 10^4 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$). Путем изменения соотношения объемов кислорода и ацетилена (от 0,85 до 2,5) легко обеспечивается восстановительно-раскислительный характер горения, что имеет особенно большое значение при напылении порошковых материалов — предотвращается образование окисной пленки на поверхности частиц и улучшается их адгезия с основным металлом.

Принцип работы установки для газопламенной металлизации рассматривается на примере наиболее распространенной в настоящее время модели УПН-8-68 (рис. 1.114). Кислород и ацетилен из баллонов 7 и 6 поступают через редукторы по шлангам 4 в распылительный пистолет 1, в корпусе которого размещено инжекторное устройство. Если кислород поступает в горелку под давлением, то ацетилен в смесительную камеру — в результате инжектирующего действия кислородной струи, вытекающей из сопла инжектора с критической скоростью. Вследствие различия скоростей истечения кислорода и ацетилена происходит их смешение. В пламя, истекающее из сопла пистолета со скоростью примерно 60 м/с ,

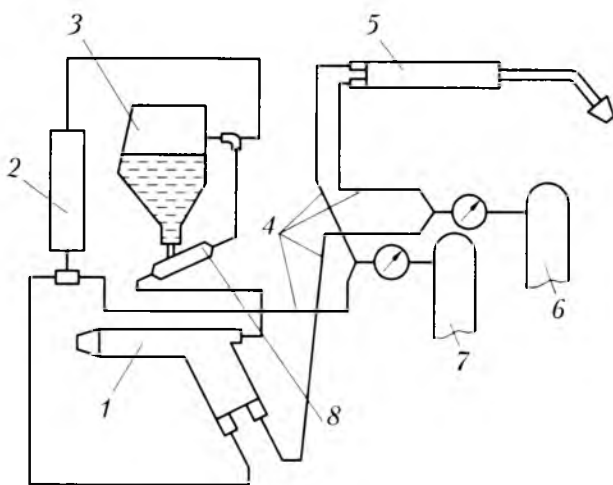


Рис. 1.114. Схема газопламенной установки УПН-8-68

в струе кислорода подается порошок. Эта струя поступает в порошок питатель 3 через ротаметр 2 и с помощью инжектора 8 увлекает порошок в распылительный пистолет 1.

Частицы порошка, имеющие сфероидальную форму (диаметром 50...150 мкм), пролетая через пламя, нагреваются до температуры плавления и, попадая на подготовленную поверхность, образуют покрытие. Производительность установки по расходу порошка — до 10 кг/ч. Покрытия из самофлюсующихся твердых сплавов подвергаются оплавлению пламенем горелки 5, которая входит в комплект установки. Необходимость операции оплавления обусловлена тем, что напыленный слой является пористым и не обладает достаточными физико-механическими свойствами. Оплавление покрытий производится непосредственно после напыления. В процессе оплавления материал покрытия не доводится до полного расплавления, покрытие как бы «запотевает». Легко плавящийся боросиликат раскисляет и растворяет окисные пленки, образовавшиеся на частицах в процессе напыления, размягчает подповерхностный слой, увеличивает его пластичность. При этом металл уплотняется, часть полностью расплавленных частиц заполняет поры, между основным металлом и напыленным слоем возникает прочная адгезионная связь.

Температура оплавления основного металла должна быть близка к температуре плавления напыляемого материала. Для самофлюсующихся сплавов она колеблется от 1050 до 1150 °С.

Наиболее эффективным способом охлаждения оплавленных деталей является охлаждение с печью, нагретой предварительно до 350 °С. Способом охлаждения, позволяющим избегать появления трещин и поволок в заготовках, является также их охлаждение в песке или в листовом асбесте.

Характеристики режимов процесса газопламенного напыления приведены в табл. 1.49 [13].

Наряду с УПН-8-68, получают распространение установки УПГТ, «Метко» (США, Италия), «Ротолой» (Швейцария). Установка порошковая газотермическая (УПГТ) является отечественной серийной промышленной установкой для нанесения покрытий из материалов с температурой плавления до 2050 °С. По сравнению с УПН-8-68 установка УПГТ способствует повышению экономич-

ности и производительности работ. Она снабжена пневматическими дозаторами порошка и газовыми мундштуками для горелок трех типоразмеров, отличающихся по назначению (для порошков с различной сыпучестью) и производительности.

Технологический процесс напыления включает следующие операции, выполняемые отдельно: подготовку поверхности, ее предварительный нагрев до 250...300 °С, напыление, диффузионное оплавление покрытия и медленное охлаждение, контроль качества покрытия.

Таблица 1.49

Характеристики режимов процесса газопламенного напыления

Показатель	Значение показателя
Максимальная производительность распыления, кг/ч: никелехромоборкремниевое твердосплавное самофлюсующееся материала (NiCrBSi) оксида алюминия	8...12 1,1...2,2
Коэффициент использования материала (КИМ) при напылении: NiCrBSi оксида алюминия	0,9...0,95 0,75...0,9
Размер частиц напыляемого порошка, мкм: NiCrBSi оксида алюминия	30...150 5...70
Рабочее давление газов, МПа: кислорода ацетилена	0,5 0,035...0,05
Максимальный расход газов, м ³ /ч: кислорода ацетилена	1,4...5,5 0,9...5
Расстояние от пистолета до напыляемой поверхности, мм	150...200
Скорость перемещения распылительного пистолета, м/мин	4,2...12
Шаг смещения распылительного пистолета на 1 мин ⁻¹ , мм	10...30
Угол распыления, град.	70...90

Приведенные примеры упрочнения на базе исследований на кафедре «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета свидетельствуют об огромных

возможностях упрочняющих технологий. Это относится к способам упрочнения, основанных на термической и химико-термической обработке материалов, комбинированных и совмещенных отделочно-упрочняющих процессов обработки заготовок. Управление качеством рабочих поверхностей и подповерхностных слоев материалов деталей является огромным технологическим резервом повышения надежности и конкурентоспособности продукции машиностроения. Этим вопросам посвящена гл. 2 настоящего пособия.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Перечислите разновидности инженерных экспериментов.
2. Дайте характеристику имеющим место ошибкам измерений.
3. Как учитываются и в случае необходимости исключаются ошибки измерения?
4. Как осуществляется выбор средств измерения?
5. Дайте характеристику методу наименьших квадратов.
6. Перечислите методы планирования экспериментов.
7. Чем характеризуются многофакторный и полный факторный эксперименты?
8. Каков порядок выполнения планов первого порядка?
9. В чем суть плана второго порядка?
10. Каков состав погрешностей обработки заготовок?
11. Каковы показатели стабильности технологического процесса изготовления деталей?
12. Какими параметрами оценивается точность обработки?
13. Как оценивается влияние различных факторов на точность и стабильность процессов обработки?
14. Как может представляться статистический ряд графически?
15. Дайте характеристику погрешностей измерения величин.
16. Как и какими средствами измеряются линейные величины?
17. Как и какими средствами измеряются угловые величины?
18. Как и какими средствами измеряются отклонения формы поверхностей деталей?
19. Опишите способы и средства измерения параметров движения.
20. Опишите способы и средства измерения колебаний.
21. Как определяются параметры волнистости поверхностей?
22. Какими параметрами характеризуется микрогеометрия поверхностей в виде шероховатости?
23. Какими способами и средствами определяются значения силовых и энергетических величин?

24. Назовите способы измерения температуры. Дайте характеристику средствам измерения температуры.
25. Перечислите методы измерения твердости материалов.
26. Как и с помощью каких средств определяется твердость по Бринеллю?
27. Как и посредством какого прибора определяется твердость по Роквеллу?
28. Как определяется твердость по Виккерсу?
29. Как определяется ударная вязкость материала?
30. Каким способом и посредством какого оборудования определяется механическая прочность материала?
31. Как определяются показатели пластичности материала?
32. Дайте характеристику усталостной прочности деталей и способам ее определения.
33. Можно ли повышать качество и свойства деталей с помощью использования технологической наследственности?
34. Каковы сущность и эффективность плазменной металлизации деталей?
35. Каковы сущность и эффективность газопламенной металлизации?
36. Опишите способы определения остаточных напряжений в материалах деталей.
37. Как определяется и что характеризует степень упрочнения материала?
38. Какими методами определяется глубина упрочненного подповерхностного слоя материала деталей?
39. В каких целях и каким образом осуществляются исследования на износ деталей?
40. Опишите одно из устройств для исследования износа деталей.
41. Дайте определение понятию «техническое противоречие».
42. Дайте определение понятиям «физическое противоречие», «узловой компонент», «узловой показатель».
43. В каких случаях вводится показатель реализуемости технической системы?
44. Как выявить наличие или отсутствие физического противоречия?
45. Какое техническое решение можно назвать типовым?
46. Приведите классификацию методов эвристического поиска научно-технических решений.
47. В чем суть поиска научно-технических решений методом мозгового штурма?
48. Какова суть поиска научно-технических решений методом контрольных вопросов?
49. Приведите краткую характеристику обобщенного эвристического метода инженерного творчества.
50. Дайте характеристику комплексному методу поиска научно-технических решений.

51. Как построить оперативную модель решения задачи?
52. Дайте характеристику эвристическим приемам разрешения физических противоречий.
53. Опишите порядок и содержание процедур постановки задачи и синтеза научно-технического решения (алгоритм поиска решения).
54. Приведите примеры поисковых задач.



ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ И СОЕДИНЕНИЙ

2.1. Требования к функциональным характеристикам изделий машиностроения и пути их реализации



2.1.1. Условия эксплуатации изделий, предопределяющие требования к конструкционным материалам, деталям и соединениям

С учетом условий эксплуатации изделий к деталям машин, приборов и аппаратов предъявляются требования высокой коррозионной стойкости, повышенной износостойкости, ускоренной прирабатываемости с малым приработочным износом, достаточной прочности, размерной стабильности в различных температурных условиях, низкого уровня загрязненности, высокого сопротивления патологическим видам изнашивания (натирам, задирам, заеданию, схватыванию), герметичности, заданных магнитоэлектрических показателей, хорошей адгезии покрытий.

Соединения изделий должны характеризоваться увеличенной площадью контактов, малым коэффициентом трения поверхностей, минимальными зазорами, их постоянством во времени и пониженной загрязненностью, отсутствием патологических видов изнашивания, хорошей прирабатываемостью поверхностей, легкостью сдвига и плавностью перемещения деталей, ламинарностью переме-

щения газов и жидкостей в зазорах, пневмо- и гидроплотностью, прочностью, малым переходным (контактным) электросопротивлением, ремонтпригодностью и другими эксплуатационными свойствами.

Специфичность условий эксплуатации многих изделий машиностроения предопределяет использование в качестве конструкционных материалов специальных сталей, титановых, никелевых, железоникелевых, других сплавов, которые по своим технологическим свойствам относятся к категории труднообрабатываемых материалов. Но комплекс требуемых свойств деталей изделий обеспечивается не только выбором материалов, но и микрогеометрией рабочих поверхностей, состоянием подповерхностного слоя материала, выбором соответствующей механической, термической, химико-термической, другой обработки покрытия, их комбинаций.

Для ответственных и прецизионных деталей станков, автомобилей, тракторов и другой техники используются легированные стали с последующей термической и химико-термической обработкой (ТО и ХТО) или покрытием.

В судовом машиностроении, морском приборостроении, общем машиностроении, авиа- и ракетостроении, энергомашиностроении, химическом машиностроении и других отраслях широкое применение находят конструкционные материалы со специальными свойствами: коррозионно-, кислото-, тепло- и жаростойкие стали (12X18H10T, 40X18H2M и др.); никелевые сплавы (ХН67ВМТЮ, ХН77ТЮ и др.); титановые сплавы (ВТ1-1, ВТ3-1, ВТ5 и др.); железоникелевые сплавы — пермаллон (50Н, 79НМ и др.). Специальные стали используются для изготовления деталей, работающих в условиях коррозионного воздействия и температур до 1073 К. Никелевые сплавы применяются для деталей, работающих в условиях агрессивных сред и температур до 1150 К [8, 9, 22].

В ряде отраслей широко используются титановые сплавы, которые характеризуются самой высокой удельной прочностью (табл. 2.1); небольшой плотностью; повышенной температурой плавления; высокой коррозионной и эрозионной стойкостью на воздухе, в морской воде, в органических и многих неорганических кислотах и щелочах; биологической инертностью; немагнитностью; малым температурным коэффициентом линейного расширения, близким к коэффициентам расширения стекла и материалов магнитопроводов

микроэлектромашин — пермаллоев. Эти сплавы хорошо работают в условиях знакопеременных нагрузок, вибрации, теплосмен, ударов и не меняют своих свойств при низких (до 20 К) и высоких (до 900 К) температурах.

Наряду с перечисленными положительными характеристиками, титановые сплавы обладают повышенной фрикционностью, малой теплопроводностью и большими электросопротивлением, склонны к патологическим видам изнашивания и ползучести (BT1-1).

Таблица 2.1

**Удельная прочность конструкционных материалов
(температура 293 К)**

Материал	Предел прочности σ_b , МПа	Плотность γ , г/см ³	Удельная прочность, МПа · см ³ /г
Титановые сплавы:			
BT1-1	700	4.5	155.6
BT3-1	1200	4.5	266.7
BT5	950	4.4	215.9
BT6	1100	4.4	250.0
BT15	1500	4.5	333.3
Никелевые сплавы:			
XH67BMTЮ	1100	8.7	126.4
XH82TЮМБ	1350	8.8	153.4
Магнийевый сплав МА5	270	1.8	150.0
Стали:			
45	610	7.8	78.2
12X18H10T	600	7.7	77.9
30XГСА	1100	7.8	141.0
40X18H2M	1120	7.7	145.5
Алюминиевые сплавы			
АЛ4	240	2.7	88.9
АЛ19	340	2.7	125.9
Медный сплав Л63	360	8.7	41.4

Из титановых сплавов изготавливаются детали судовых машин и приборов, высокоточных оптических и оптико-механических систем, аппаратуры и оборудования химических производств

и цветной металлургии, энергетических устройств, автомобилей и бытовой техники.

В табл. 2.2 приведены коэффициенты относительной обрабатываемости этих материалов по скорости v резания и твердости при обкатывании (коэффициент $K_{но}$ определяется делением ширины выдавливаемой шаром при силе поджима P канавки по поверхности — твердости при обкатывании $НО_c$ сравниваемого материала на ширину канавки, выдавливаемой тем же шаром при одинаковой силе P , на поверхности — твердости при обкатывании $НО_3$ металла, принятого за эталон [7, 20]).

Таблица 2.2

**Обрабатываемость труднообрабатываемых материалов
резанием и ППД**

Материал	Термообработка	Предел прочности σ_B , МПа	Коэффициент обрабатываемости		
			по скорости резания K_t	по твердости $K_{но}$ в сравнении	
				со сталью 45	со сплавом ВТ1-1
Стали:					
45	Отжиг	550...610	1.0	1.0	1.04
12Х18Н10Т	Аустенизация	550...600	0.50	1.1	1.15
Титановые сплавы:					
ВТ1-1	Отжиг	550...700	0.45...0.60	0.96	1.0
ВТ3-1	Отжиг	950...1200	0.19...0.28	0.74	0.77
ВТ5	Отжиг	800...950	0.25...0.40	0.80	0.83
ВТ6	Отжиг	900...1100	0.20...0.32	0.75	0.78
ВТ15	Закалка и старение	1115...1500	0.18...0.24	0.72	0.76
Никелевый сплав ХН67ВМТЮ	Аустенизация и старение	1000...1100	0.08...0.10	0.79	0.82

Из табл. 2.2 следует, что обрабатываемость специальных материалов резанием значительно ниже обрабатываемости стали 45, а их обрабатываемость ППД близка к стали 45 и сплаву ВТ1-1.

Из сплавов 50Н и 79НМ изготавливаются детали магнитопроводов микроэлектромашин автоматики, элементов вычислительных и управляющих устройств.

Требования к некоторым прецизионным деталям и соединениям приведены в табл. 2.3, откуда следует, что прецизионные детали и соединения:

□ наряду с традиционными, должны обладать присущими только им эксплуатационными свойствами, в том числе размерной стабильностью, малым уровнем загрязненности продуктами обработки и изнашивания, постоянством зазоров, магнитных и электрических свойств, коррозионной стойкостью практически во всех средах, высокой степенью герметичности деталей и плотности подвижных и неподвижных соединений, легкостью сдвига и плавностью пере-

Требования к прецизионным

Изделие, взаимодействующие пары и вид соединения	Требования к эксплуатационным свойствам	
Асинхронные тахометрические агрегаты АДТ-507, корпус — крышка, корпус — кольцо, неподвижное, разъемное	Немагнитность, размерная стабильность, сопротивление схватыванию, малый уровень загрязнения, постоянство электрических свойств	
АДТ-507, корпус — пакет статора, сердечник — пакет ротора, неразъемное	Немагнитность корпусов и сердечников, их размерная стабильность, постоянство зазоров между статором и ротором, отсутствие замыкания пластин пакетов, малый уровень загрязненности их поверхностей, сохранение магнитной проницаемости, индукции, малой коэрцитивной силы пермаллоя, обеспечение малой магнитной асимметрии и незначительного теплового воздействия на пакеты в процессе их обработки	
Микромашинны автоматик, коллектор — щетки, подвижное (с постоянным контактом)	Малое контактное сопротивление, износостойкость, отсутствие искрения в контакте, малый уровень загрязненности, износостойкость	
Малогобаритный следящий трансформатор, пакет ротора — пакет статора, подвижное	Малый уровень загрязненности, постоянство зазоров и магнитных свойств материала магнитопроводов, отсутствие замыкания пластин между собой, малое тепловое воздействие при обработке	

мещения деталей в подвижных соединениях сухого трения, ламинарностью перемещения газа в зазорах и кумулятивностью струи;

□ имеют высокую точность размеров и формы в пределах 5–7 квалитетов;

□ обладают поверхностями с малой шероховатостью и значениями параметра Ra от 0,1 до 0,6 мкм;

□ характеризуются уровнями А, В и С относительной геометрической точности (соотношение между допуском формы или расположения поверхностей и допуском размера соответственно 60, 40 и 25 %, а для цилиндрических поверхностей — 30, 20 и 12 %).

Таблица 2.3

деталям и соединениям

Конструкционные материалы	Квалитеты и уровни относительной геометрической точности	Значение $Ra_{гр}$, мкм	Способы обработки и покрытия
Титановый сплав ВТ1-1	5–7, С	0,4	Обтачивание и растачивание после отжига заготовок
Корпус ВТ1-1, сердечник ВТ5, пакеты ротора и статора — 79НМ	5–6, С	0,2	Растачивание и обтачивание корпусов и сердечников, шлифование пакетов
Пластины коллектора — М1, щетки БрБ2	5, 6, В	0,2	Обтачивание и шлифование, коллектор имеет родиевое покрытие (толщина 4...5 мкм)
50Н	6, 7, В	0,4	Шлифование

Изделие, взаимодействующие пары и вид соединения	Требования к эксплуатационным свойствам
Автомобильные коробки пере- мены передач (КПП), шестер- ня — штурцер, подвижное	Износостойкость шейки (с маслогонной ка- навкой) шестерни и отверстия штурцера, дли- тельное сохранение малого зазора и гидро- плотности соединения
Автомобильные КПП, редук- торы станков, пневмоприводы, муфты вал — манжета, ци- линдр — кольцо, подвижное	Износостойкость сальника (уплотнительно- го кольца) и длительное сохранение гидро- и пневмоплотности соединений
Блок стабилизации автомата глубины, цилиндр — поршень демпфера, подвижное (сухого трения)	Легкость сдвига, плавность продольного пе- ремещения, износостойкость, коррозионная стойкость, малый уровень загрязненности, ад- гезия нанесенного слоя и отсутствие микро- пор в покрытии
Датчиковая система космиче- ских аппаратов, корпус термо- пары — пробка, неразъемное	Пневмоплотность стыка корпуса с заливае- мой в жидком виде стеклянной пробкой (изо- лятором выводных проводов) в различных температурных условиях атмосферы и кос- моса
Азимутальные шаровые гироскопы (аэродинамические под- шипники оборудования), ро- тор (вал) — чаша (подшип- ник), подвижное	Наименьший уровень загрязненности, ламинарность перемещения газа в зазоре, спокойная работа аэродинамического подвеса и точность работы гироскопа и подшипников в условиях вибрации и теплосмен
Устройство кумулятивного действия, трубки — кумуля- тивная струя	Ламинарность и кумулятивность струи
Глубоководная аппаратура, корпус — морская вода	Точность формы контура, оформляющего головную часть подвижного устройства, герметичность, прочность, жесткость, коррозионная стойкость, адгезия покрытия
Акустические устройства, часы (хронометры), деталь — покрытие — среда	Адгезия и качество покрытия, коррозионная стойкость деталей, эстетичность и стойкость изображения

Окончание табл. 2.3

Конструкционные материалы	Квалитеты и уровни относительной геометрической точности	Значение $Ra_{ср}$, мкм	Способы обработки и покрытия
Шестерня ведомая привода синдметра — сталь 20, шлицер гибкого вала — сталь А12	6, 7, В	0,6	Шлифование, шлирование (толщина слоя 0,15...0,3 мм), закалка 57...61 HRC, зачистка шкуркой
Муфты — сталь 40Х, валы — сталь 50Х, цилиндр — стали 12Х18Н10Т и 40Х18Н2М, манжета и кольцо — резина ИРП-1229	7, А	0,4; 0,2	Закалка ТВЧ 55...57 HRC, шлифование
Цилиндр — ЛС59-1, поршень — Л63	7, В	0,1	Доводка перед покрытием, химическое никелирование (толщина слоя 10...12 мкм), доводка по слою покрытия
Корпус — ВТ6, ВТЗ-1, пробка — стекло термостойкое до 923 К	7, В	0,4	Растачивание
Ротор — ШХ15, чаша — БрО8С12	5, 6, С	Ротор 0,1; чаша — 0,2	Ротор — закалка 66 HRC и доводка, чаша — растачивание и доводка пастами в процессе отладки и испытания прибора
М1, ХН67ВМТЮ, ВТЗ-1	7, А	0,4	Растачивание
АЛ4 (АК9), АЛ9 (АК7)	7, В	0,4	Обтачивание, шлифование шкуркой
Деталь Л63 (ЛС59-1), покрытие — никель или хром + нитро-эмаль НЦ11А	7, В	0,1	Обтачивание, опилование, фрезерование, полирование пастой

При таком высоком уровне требований к эксплуатационным свойствам шероховатость поверхностей прецизионных деталей и соединений регламентируется практически одним высотным параметром Ra , состояние металла — одной твердостью HRC, а обработка рабочих поверхностей осуществляется лишь обычными способами резания. Этим можно объяснить положение, при котором детали и соединения, полностью соответствующие требованиям чертежей и техпроцессов, не выполняют своего целевого назначения.

Изложенное выше подтверждает необходимость изучения, анализа и исследования взаимосвязи микрогеометрии рабочих поверхностей и состояния подповерхностного слоя материала деталей с эксплуатационными характеристиками изделий, обобщения и описания опыта по технологическому обеспечению эксплуатационных свойств деталей и соединений.

2.1.2. Взаимосвязь эксплуатационных свойств с состоянием поверхностей и подповерхностного слоя материала деталей

Одним из основных понятий, характеризующих контактирование поверхностей, является площадь контакта. Г. Герц считал, что площадь A , контакта шара с плоскостью имеет форму круга радиусом r . Но в реальных условиях контактирование происходит по отдельным «островкам» в зоне круга радиусом, превышающим величину r по Герцу.

Для анализа закономерностей контактирования поверхностей И.В. Крагельский предложил стержневую и сферическую модели шероховатой поверхности, а в дальнейшем ввел характеристику шероховатой поверхности в виде безразмерного комплекса:

$$\Delta_1 = \frac{R_{\max}}{rb_n^{\frac{1}{v}}},$$

где $R_{\max}$ — наибольшая высота неровностей профиля; r — радиус скругления неровностей; b_n , v — параметры аппроксимации опорной кривой.

Э.В. Рыжов и его ученики отмечают, что на сближение шероховатых поверхностей оказывают влияние высотные и шаговые

характеристики как шероховатости, так и волнистости (Ra , $R_{\max}$, Sm , W_z , S_{ac} и др.).

Я.А. Рудзит и его коллеги установили влияние шероховатости на площадь контакта поверхностей с помощью отношения Sm/Ra .

И.А. Гринвуд и И.Б.П. Вильямсон описали модель контакта шероховатой и гладкой поверхностей, построенную на допущениях: радиус скругления всех неровностей r_{cp} , высота выступов подчиняются нормальной функции распределения со стандартным отклонением σ_p , плотность расположения выступов D_s , контакт отдельного выступа соответствует Герцу. С помощью модели установлено, что фактическая площадь контакта прямо пропорциональна нагрузке, а постоянная пропорциональности зависит от геометрических параметров шероховатости поверхности. В последующем модель получила уточнение и было предложено условие перехода от упругой деформации к пластической, описанное «индексом пластичности», в котором в качестве характеристики шероховатости поверхности использовано отношение σ_p/r_{cp} .

Ф.Ф. Линг исследовал контакт шероховатых поверхностей, моделированных набором вертикальных конусов. При этом установлено, что при контактировании двух шероховатых поверхностей их сближение зависит от нагрузки в значительно большей степени, чем при контакте шероховатой поверхности с гладкой. Если при контакте двух шероховатых поверхностей значение степени достигает 7, то для контакта шероховатой поверхности с гладкой он не превышает 3,5. При рассмотрении вероятности встречи двух выступов Линг пришел к выводу, что увеличение показателя степени обусловлено возрастанием встречи выступов по мере сближения шероховатых поверхностей. В дальнейшем Т. Хисакадо и другими исследователями установлено влияние на процесс контактирования поверхностей угла α наклона образующих выступов неровностей и его рассеивания.

А.В. Буш и другие исследователи предложили контактную модель, базирующуюся на математическом методе подхода к случайным процессам. При нормальном законе распределения отклонений поверхностей основные свойства предложенной модели могут описываться спектральными моментами m_0 , m_2 и m_4 , позволяющими определять значения α , r и все другие геометрические параметры нормально распределенной случайной поверхности. Модель

аппроксимирует выступы поверхности с помощью параболоида с кривизной действительного выступа.

А.Г. Суслов исследовал универсальную модель, наиболее точно описывающую выступы и впадины одновременно шероховатости и волнистости поверхностей после различных методов обработки, в виде эллиптического параболоида n -го порядка. Для этой модели сечения, получаемые от пересечения профиля поверхности с плоскостью, перпендикулярной средней плоскости, представляют собой параболы n -го порядка, а с плоскостью, параллельной средней плоскости, — эллипсы. Профили поверхностей, моделированных параболоми n -го порядка, показаны на рис. 2.1 [5]. Экспериментальные исследования показали, что для точения, фрезерования, строгания в поперечном направлении характерны профили 1, 2 ($n \leq 1$), в продольном направлении — профиль 4 ($n = 4$); для шлифования в поперечном и продольном направлениях — профили 1, 2, 3 ($n \leq 2$); для вибронакатывания, магнитоабразивных и электрохимических методов обработки — профиль 3 ($n = 2$); для накатывания и полирования в обоих направлениях — профиль 4 ($n = 4$).

В.А. Валетовым предложен метод безразмерного профиля поверхности, позволяющий использовать в качестве критериев ее микрогеометрии функции и плотности распределения ординат и углов наклона профиля. В общем случае микрогеометрия реальной обработанной поверхности зависит от многих факторов, поэтому ее можно рассматривать как реализацию случайного поля. Тогда профиль реальной поверхности есть реализация случайной функции, а самой полной информацией о профиле располагают функции плотности распределения его отклонений от средней линии (ординат) и углов наклона. Поэтому и рекомендовано использовать в качестве критериев оценки микрогеометрии поверхности графические изображения этих функций. Для менее точной

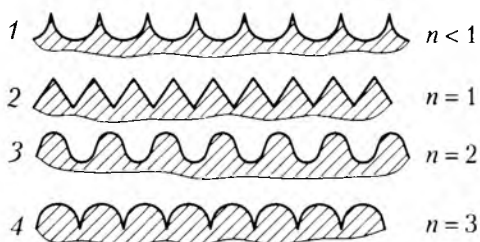


Рис. 2.1. Профили поверхностей, неровности которых моделированы параболоми n -го порядка

оценки можно применять графические изображения указанных выше функций или его опорной кривой (относительной опорной кривой). Можно также для различных функциональных свойств поверхности построить шаблоны всех функций, по которым и определять соответствие данной поверхности заданному профилю [5].

Описанные и другие теоретические модели контактирования шероховатых поверхностей и методы их оценки стали основой многих исследований, направленных на улучшение различных эксплуатационных свойств деталей [1–11, 15, 16, 20, 21]. В результате исследований установлено, что на показатели трения и износа деталей в подвижных соединениях большое влияние оказывают высотные параметры и форма неровностей, направление следов обработки и радиус скругления выступов, другие параметры микрогеометрии рабочих поверхностей.

Так, Э.В. Рыжовым и его учениками для определения линейного (размерного) износа I получено выражение

$$I = \beta_1 S_n^{\alpha'},$$

где S_n — путь трения, км; β_1 ; α' — параметры кривой начального износа, зависящие от $R_{\max}$, $r_{\text{ср}}$ и других параметров шероховатости поверхностей.

Результаты корреляционно-регрессионного анализа показывают, что 70...80 % всей вариации показателей износостойкости связаны с параметрами микрогеометрии.

Для определения динамической жесткости S_d соединений при высоких предварительных напряжениях П.Р. Наяка получено соотношение

$$S_d \approx 3P_n/2R_q,$$

где P_n — нормальная сила; R_q — среднее квадратическое отклонение профиля.

В соответствии с молекулярно-механической теорией трения сила трения в каждом конкретном случае характеризуется коэффициентом трения

$$f_d = \frac{\tau_o}{p_r} + \beta_{\text{пк}} + K_{\text{к}} \alpha_t \sqrt{\frac{h_d}{r}},$$

где τ_o — прочность на срез места адгезионной связи; p_r — контурное давление; $\beta_{\text{пк}}$ — пьезокоэффициент, характеризующий увеличение

прочности на срез при увеличении нормального напряжения: K_K — коэффициент, зависящий от вида контакта; α_T — коэффициент гистерезисных потерь; h_d — длина внедрения; r — радиус скругления неровностей.

Установлено также, что переходное электросопротивление контактирующих поверхностей зависит меньше от суммарной факти-

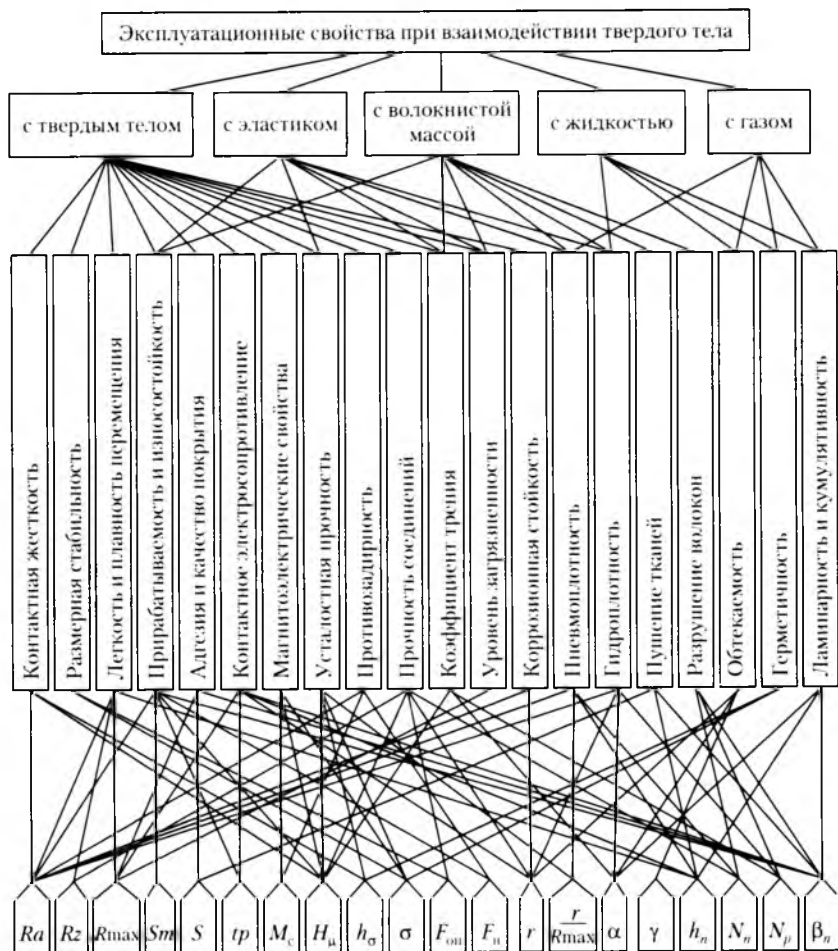


Рис. 2.2. Влияние параметров микрогеометрии поверхностей и состояния материалов на эксплуатационные свойства деталей и пар

ческой площади A , контакта и больше — от радиуса скругления r микронеровностей и их расположения. Особенно это проявляется при загрязнениях и пленках на контактирующих поверхностях.

Здесь уместно отметить, что с точки зрения электросопротивления контакта и других свойств соединений поверхности с профилями 1 и 4 (см. рис. 2.1) будут вести себя по-разному.

Анализом приведенных примеров и многочисленных исследований установлено комплексное влияние на эксплуатационные свойства деталей и соединений параметров качества рабочих поверхностей и состояния подповерхностных слоев контактирующих материалов. Обобщенные результаты анализа позволили классифицировать влияние параметров микрогеометрии поверхности и состояния подповерхностного слоя материала на важнейшие эксплуатационные свойства деталей при их взаимодействии с другими деталями и средами (рис. 2.2). С учетом комплексного влияния на эксплуатационные свойства деталей и соединений в классификацию включены все стандартизированные и основные нестандартизированные параметры микрогеометрии поверхностей и физико-механические характеристики материалов, микроструктура M_c , микротвердость H_μ , толщина упрочненного слоя h_σ и остаточные напряжения σ .

2.1.3. Классификация параметров оценки микрогеометрии поверхности и необходимость накопления данных по поведению деталей и соединений в изделиях

Важнейшей составной частью оценки качества деталей являются геометрические характеристики их рабочих поверхностей: отклонение формы 1, волнистость 2 и шероховатость 3, которые составляют в сечении полный профиль поверхности 4 (рис. 2.3).

В соответствии с ГОСТ 24642–81 отклонение формы — это отклонение Δ формы реальных поверхностей или реального профиля от формы номинальной поверхности или номинального профиля. Предельные отклонения формы и расположения поверхностей — допуски T круглости, цилиндричности, плоскостности, прямолинейности, параллельности и перпендикулярности назначаются только в тех случаях, когда они по значению должны быть меньше допуска на размеры.

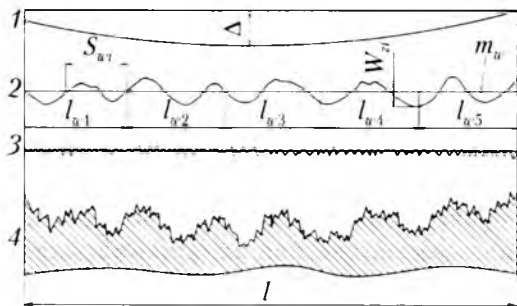


Рис. 2.3. Профиль поверхности и его составляющие

Установлены уровни относительной геометрической точности, являющиеся соотношением между допуском формы или расположения поверхностей и допуском их размера: *A* — нормальная, *B* — повышенная, *C* — высокая, при которых допуски отклонения формы и расположения поверхностей составляют соответственно 60, 40 и 25 % (допуски формы цилиндрических поверхностей — 30, 20 и 12 %) от допуска размеров.

В странах СНГ волнистость не стандартизирована и включается в отклонения формы. В обоснованных случаях допускается нормировать отдельно волнистость поверхности или часть отклонения формы без учета волнистости. Существует принятая по линии СЭВ рекомендация по стандартизации РС 3951–73 «Волнистость поверхности. Термины, определения и параметры», согласно которой *волнистость* — это периодически возникающие неровности геометрической структуры поверхности, вызываемые непредусмотренными колебаниями или подобными колебаниям относительными движениями в технологической системе.

Волнистость 2 (рис. 2.3) определяется на перпендикулярном сечении поверхности 4 с исключением отклонения формы 1 и шероховатости 3. Параметры волнистости: W_z — высота (среднее арифметическое значение пяти измерений высот W_{zi} ($i = 1, 2, \dots, 5$), измеренных на одинаковых участках $l_{w1}, l_{w2}, \dots, l_{w5}$; $W_{\max}$ — наибольшая высота волны; S_w — средний шаг (среднее арифметическое значение длин S_{wi} отрезков средней линии); r_e — радиус шупа механического фильтра шероховатости (ряд 0,25; 0,8; 2,5; 8,0 мм); r_f — радиус шупа механического фильтра формы (ряд 8, 25, 80 мм); λ_R — предельная длина волны электрического фильтра шерохова-

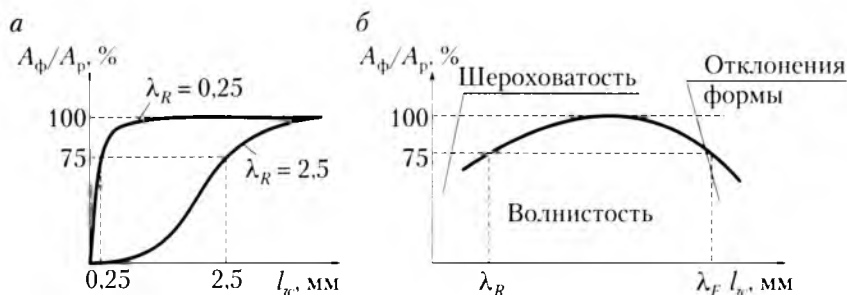


Рис. 2.4. Характеристики фильтров для фильтрации:
 а — шероховатости поверхности; б — отклонений формы (A_ϕ — амплитуда фильтровая, A_p — амплитуда реальная)

тости (ряд 0,08; 0,25; 0,8; 2,5 мм); λ_F — предельная длина волны электрического фильтра формы (ряд 2,5; 8; 25 мм). При механической фильтрации числовые значения r_e и r_f выбираются по зависимостям

$$r_e = 2,5S_w^2/Rz, \quad r_f = S_w^2/W_2.$$

При электрической фильтрации фильтры выбираются по графикам (рис. 2.4).

Параметры волнистости отсчитываются от средней линии m_w профиля и базовой линии волнистости, эквидистантной линии m_w . К волнистости относятся неровности с соотношением шага к высоте 50...1000. У изделий с круглым сечением к волнистости относятся отклонения в радиальном сечении с шагом меньше 1/15 окружности. Длина базовой линии волнистости l_w должна быть не менее пятикратного наибольшего шага $S_{w\max}$.

Шероховатость поверхности оценивается высотными, шаговыми и структурными параметрами. К высотным параметрам шероховатости по ГОСТ 2789–73 относятся среднее арифметическое отклонение профиля Ra , высота неровностей Rz по 10 точкам, наибольшая высота неровностей профиля $R_{\max}$, а также среднее квадратическое отклонение профиля R_q , высоты наибольшего выступа R_p и наибольшей впадины профиля R_t . Между ними существуют соотношения:

$$Ra = 0,8R_q.$$

$$R_{\max} = 4,2R_q = 5,2R_a,$$

$$R_p + R_c = R_{\max}.$$

К шаговым параметрам шероховатости по ГОСТ 2789–73 относятся шаг неровностей по средней линии S_m и средний шаг неровностей по вершинам S (рис. 2.5).

К структурным параметрам шероховатости по ГОСТ 2789–73 относятся (рис. 2.5, а) опорная длина профиля η и относительная

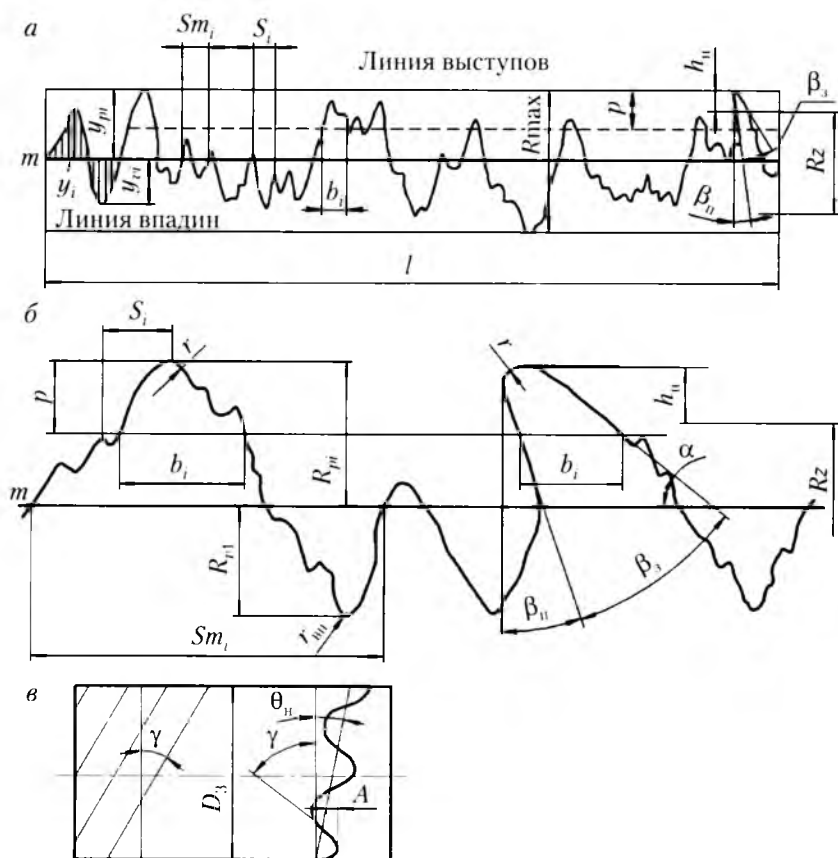


Рис. 2.5. Параметры микрогеометрии поверхности и данные для их определения:

а — на профиле сечения и базовой длине; б — на единичных обыкновенной и поднутренной неровностях; в — на виде сверху

опорная длина профиля tp , а также нестандартные параметры: относительная опорная площадь поверхности $F_{оп}$, радиус r скругления неровностей, отношение r/R_{max} , угол α наклона образующих неровностей, угол γ направления следов обработки, средний уклон t_y профиля, число выступов профиля m_n , параметр v степенной аппроксимации кривой опорной поверхности, другие характеристики. Обозначение стандартных параметров шероховатости на чертах осуществляется по ГОСТ 2.309–2011.

Для оценки поверхностей вязкопластичных материалов автором введены параметры (рис. 2.5, б): превышение h_n поднутренных неровностей (ПН) над уровнем R_z , углы поднутрения β_n и заострения β_z , плотности расположения ПН на единице площади поверхности N_n и сечения N_p .

По ГОСТ 24773–81, РМР включают в себя полностью регулярные микрорельефы (ПРМР) и частично регулярные микрорельефы (ЧРМР). Поверхности с ПРМР характеризуются параметрами: высотой R элемента, числом N_z элементов на 1 мм^2 площади, относительной площадью T_p , углами направления расположения элементов β_z и γ_z . Поверхности с ЧРМР оцениваются параметрами: высотой (для микрорельефов с элементами выпуклой формы) и глубиной (для микрорельефов с элементами вогнутой формы) регулярной неровности h , относительной площадью F_n , углом сетки (направления) неровностей γ (рис. 2.5, в), углом θ_n направления систем неровностей, а также осевым и круговым шагами неровностей S_o и S_k , амплитудой непрерывной регулярной неровности A .

Таким образом, существуют стандартизованные и нестандартизованные параметры микрогеометрии поверхностей. Их можно также подразделить на абсолютные и относительные. Л.И. Экслер предложил классифицировать параметры микрогеометрии поверхностей еще по двум принципам. По первому принципу все параметры микрогеометрии подразделяются на интегральные, усредненно описывающие весь профиль поверхности, и локальные, описывающие характерные с той или иной точки зрения участки профиля. По второму принципу параметры микрогеометрии на основе функциональной связи их с математической функцией профиля разделяются на параметры нулевого, первого и второго порядка. В первом случае параметры определяются через ординаты профиля; во втором — через значения первой производной либо через комбинацию

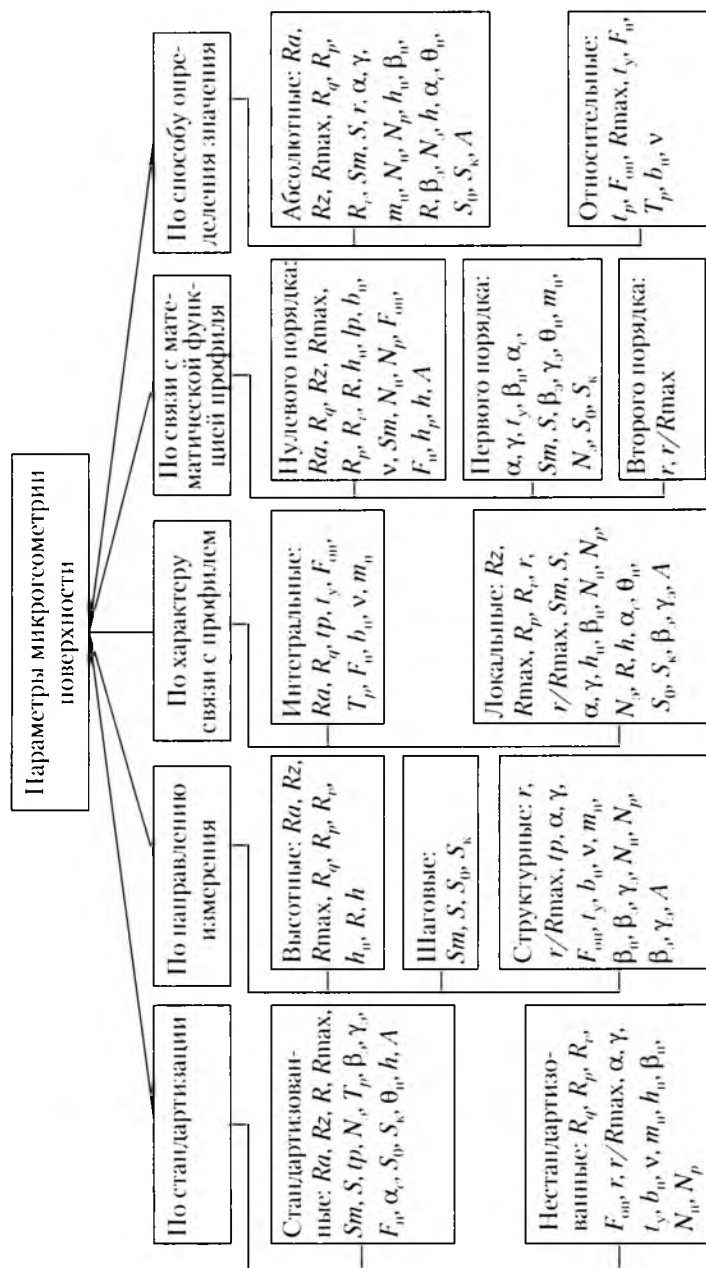


Рис. 2.6. Классификация параметров микрогеометрии поверхности

значений ординат профиля и его первой производной; в третьем — через значения второй производной либо через комбинацию первой и второй производной. Полная классификация параметров микрогеометрии поверхностей представлена на рис. 2.6.

Улучшение качества и эксплуатационных свойств деталей и соединений должно достигаться несколькими путями. Первым из них можно считать совершенствование традиционных процессов резания, применяемых металлорежущего оборудования и оснастки. Вторым путем является применение способов обработки ППД, включая вибрационные процессы как наиболее производительные, просто осуществляемые, обеспечивающие управление микрогеометрией обрабатываемых поверхностей и упрочнение подповерхностного слоя материала деталей. Ведь по обрабатываемости ППД труднообрабатываемые материалы близки к стали 45 (см. табл. 2.2). Следует отметить также комбинированные и совмещенные процессы обработки, в том числе опережающее ППД, резание и последующая отделочно-упрочняющая обработка ППД; вибро-сверление и последующее дорнование отверстий; резание, ППД и последующая химико-термическая обработка; создание на рабочих поверхностях деталей полностью и частично регулярных микрорельефов (ПРМР + ЧРМР), другие последовательно (комбинированные) или одновременно (совмещенные) осуществляемые процессы обработки.

Важным путем является также накопление данных по поведению изделий, углубление знаний о микрогеометрии поверхностей и рационализации ее параметров, создание способов и устройств контроля качества поверхностей, более информативной ее оценки и оптимизации применительно к конкретным эксплуатационным требованиям к деталям и соединениям конкретных изделий и сред их эксплуатации.

2.2. Развитие теории микрогеометрии поверхностей и метрологическое обеспечение нового подхода к ее оценке



2.2.1. Механизм возникновения неровностей поверхностей вязкопластичных материалов

Резание можно считать процессом превалирующего пластического деформирования, так как, по В.К. Старкову, в энергетическом балансе этого процесса 90 % и более приходится на работу пластической деформации. По данным Мак-Лина, относительный вклад в пластическую деформацию дислокаций, вакансий и внедренных атомов соответствует пропорции 4,5:2:1.

По сведениям В.Н. Подураева, Н.Е. Маслова, А.П. Гавриша, А.В. Якимова, при шлифовании труднообрабатываемых материалов 80 % работы превращается в теплоту, до 80 % которой переходит в заготовку. Возникающая в зоне резания локальная температура на короткое время (продолжительность $1 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-6}$ с) достигает 2273 К. Радиус скругления неработающих зерен составляет 8 мкм, а толщина среза колеблется от 0,3 до 40 мкм; локальные давления в контактах достигают 100 МПа; снятие стружки осуществляется при больших напряжениях, достигающих 87,6 ГПа. Все сказанное подчеркивает особенности процессов, происходящих при резании вязкопластичных материалов, и влияния на них целого ряда факторов.

Существует несколько дислокационных механизмов разрушения металлов. По описанному В.К. Старковым механизму (рис. 2.7, а)

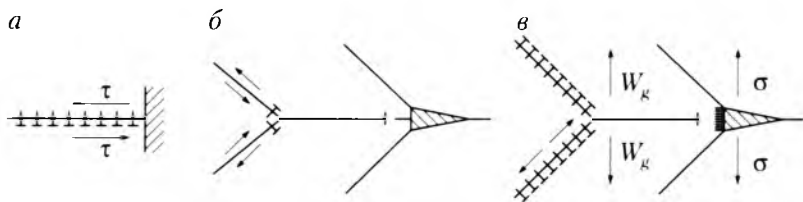


Рис. 2.7. Механизмы образования трещин в результате скопления дислокаций

возникновение трещины разрушения объясняется плоским скоплением дислокаций, которые нагромождаются при встрече с сильными энергетическими барьерами в виде границ двойников и зерен, инородных включений и других препятствий. В результате растягивающее напряжение у головной части может превысить теоретическую прочность материала и привести к распространению трещины до границы зерна или до какого-либо другого барьера.

Согласно механизму А.Х. Котрелла, дислокации,двигающиеся в двух пересекающихся плоскостях скольжения, сливаются вдоль линии пересечения и также образуют трещину (рис. 2.7, б, в). По модели Котрелла, разрушающее напряжение зависит от размера зерна, с увеличением которого необходимое напряжение разрушения уменьшается.

Описанные явления влияют на формирование микрорельефа поверхности. По свидетельству А.И. Исаева, микрорельеф поверхности является одновременным проявлением механизмов пластической деформации у вершины движущейся трещины, ее ветвления и пластической деформации при трении инструмента с обработанной поверхностью. Ж. Фридель отмечает, что в результате эмиссии дислокаций в трещине на ее поверхности образуются микроскопические ступеньки. По Т. Екорби, субмикрорельеф поверхности является следствием того, что распространяющаяся в кристалле трещина пересекает ряд винтовых дислокаций и образует на поверхности кристалла ступеньки, высота которых равна вектору Бюргерса пересеченной дислокации. Наложение таких ступенек приводит к образованию более высоких ступенек.

Исследования В.П. Назаренко и Ю.И. Короленко показали, что пластическая деформация при воздействии задней поверхности режущего инструмента на обрабатываемую поверхность предопределяет выход дислокаций на поверхность металла и образование ступенек сдвига высотой до 0,5 мкм. Окисные пленки препятствуют выходу дислокаций и, следовательно, затрудняют образование ступенек. Этим можно объяснить уменьшение шероховатости поверхности при применении СОЖ, которые способствуют созданию оксидных пленок на металлах.

На шероховатость поверхности оказывает также влияние жесткость технологической системы. При обработке тонкостенных, нежестких и неравножестких заготовок из вязкопластичных мате-

риалов возможно возбуждение автоколебаний. Вибрация может возникать в результате неустойчивости фрикционного взаимодействия инструмента и заготовки, характера их упругопластического контакта и скорости резания. Возможно также явление резонанса различных по источнику возникновения колебаний.

Многие исследователи отмечают появление на обрабатываемых резанием поверхностях и проявление в процессе эксплуатации изделий специфических неровностей, отличных от обычных по форме и поведению. А.М. Дальский описал неровности («пороки») специфического вида, возникающие при отделочной обработке поверхностей высокоточных валов и шпинделей из сталей типа 38ХМЮА. Определенная роль в формировании шероховатости при этом отведена режимам шлифования, засаливанию кругов и наростообразованию. Отмечено, что при обработке возникает молекулярное схватывание нароста с основным металлом и нарост-задир остается на поверхности. К порокам поверхностей А.М. Дальский отнес также своеобразную «сыпь», создаваемую переносом на заготовку частиц материала изнашивающегося лезвийного инструмента. Связь частиц с поверхностью заготовки настолько велика, что их невозможно удалить наждачной шкуркой.

В.Н. Подураев описал поверхности, полученные при обработке с образованием элементной стружки и нароста, которые обладают особыми неровностями, расположенными в направлении перемещения инструмента. Он назвал такие поверхности «чешуйчатыми» и «муаровыми». Чешуйчатая поверхность характеризуется периодически повторяющимися в направлении движения резания выступами. Муаровая представляет собой периодически повторяющиеся криволинейные светлые полосы. Значительная роль при этих явлениях отведена выдавливанию металла при резании, температурным и другим воздействиям.

О специфических неровностях упоминают Р.Г. Махкамов (пилообразные субмикронеровности поверхностей деталей хлопкообрабатывающих машин), П.И. Ящерицын (наростообразование, задиры) и другие исследователи.

Установлено, что специфические микронеровности возникают при отделочной обработке труднообрабатываемых и других вязкопластичных материалов, когда снимаемый слой по толщине меньше радиуса скругления режущих кромок лезвийного инструмента

и происходит не управляемый по геометрии процесс резания. При этом режущая кромка скользит по поверхности, появление раздельной трещины и снятие материала наблюдается лишь в периоды, когда высота перемещающейся перед инструментом волны металла приблизится по значению к радиусу скругления режущей кромки.

Наиболее нестабильный и неуправляемый по геометрии процесс резания присущ абразивной обработке, при которой наблюдается массовое деформирование и микрорезание (царапание) обрабатываемого металла большим числом зерен из абразива, алмаза, эльбора и другого материала. Нестабильности процесса абразивной обработки способствуют отрицательные передние углы, радиусы скругления и площадки изнашивания зерен; трение о металл зерен, связки и частиц снятого металла; неупорядоченное и разновысотное положение зерен относительно обрабатываемой поверхности; химическое и адгезионное взаимодействие материалов заготовки и инструмента.

По Е.Н. Маслову, все зерна абразивного инструмента можно разделить на режущие 1 (10 %), давящие 2 (12 %) и неработающие 3 (78 %) (рис. 2.8). Схема режущего (шлифующего) зерна и микрорезания показана на рис. 2.9. У зерна можно различить переднюю поверхность ECB , заднюю поверхность BC_1E_1 и отрицательный передний угол γ_3 . Микровыступы и субмикровыступы зерна имеют значение самостоятельных царапающих элементов и могут снимать стружки толщиной в 10–100 раз меньших по сравнению с основным царапающим элементом. В результате

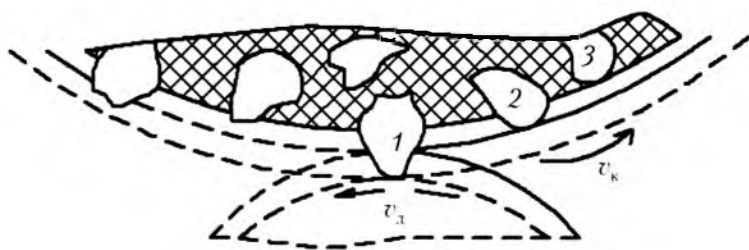


Рис. 2.8. Зёрна шлифовального круга:

1 — режущие; 2 — давящие; 3 — неработающие; v_k — скорость круга;
 v_d — скорость детали

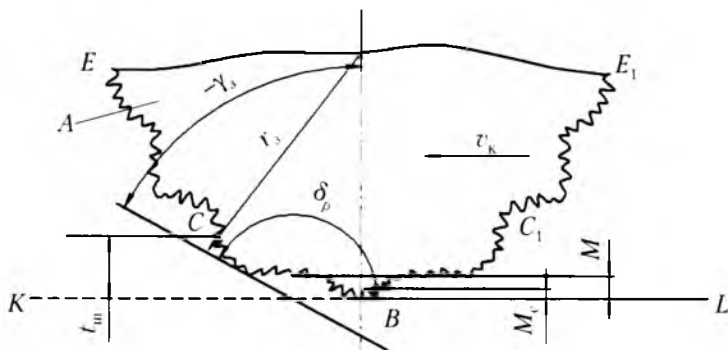


Рис. 2.9. Схема шлифующего зерна при микрорезании:

A — основной царапающий элемент; M — микровыступ; M_с — субмикровыступ; KL — линия среза

скругления зерна радиусом r_z в зоне снятия тонких стружек имеют место тупые углы резания δ_p , зависящие от толщины снимаемого слоя $t_{ш}$. С повышением пластичности и вязкости обрабатываемых металлов возрастает доля пластического оттеснения материала по краям царапины и уменьшается доля удаленного металла, что характеризуется коэффициентом стружкообразования $K_c = V_y/V_0$ (здесь V_y — объем удаленного металла, V_0 — теоретический объем царапины). Для труднообрабатываемых материалов $K_c = 0,2...0,4$.

Замечено химическое взаимодействие с алмазным инструментом титановых сплавов, циркония и ниобия [9]. По свидетельству Е.Н. Маслова и Н.В. Постниковой, при микрорезании железоуглеродистые сплавы, никель, кобальт выступают как своеобразные катализаторы перехода алмаза в графит. В процессе абразивной обработки на зернах образуются сравнительно толстые наросты металла.

Фотографические и микроскопические исследования [6, 9] показали, что специфические микронеровности в виде остатков нароста, микрозаусенцев, надрывов гряд неровностей, задиров и других нерегулярных по форме образований обладают значительной асимметрией строения и являются результатом неуправляемости по геометрии процесса отделочного резания. При этом за счет механического, фрикционного, адгезионного, пластического, химического, теплового и другого воздействия инструмента и среды

на обработанных поверхностях возникают неровности с высокой степенью однонаправленности вершин и большим односторонним углом наклона образующих, достигающим $90...110^\circ$ и более, что обуславливает возникновение угла поднутрения $\beta_{\text{п}}$ и послужило основанием автору называть такие неровности поднутренными.

Изучение и анализ поперечных шлифов образцов из стали 12Х18Н10Т и других материалов показали, что поднутренные неровности (ПН) составляют суть микрогеометрии поверхностей вязкопластичных металлов и других труднообрабатываемых материалов после отделочной обработки резанием. Поднутренными являются 100 % неровностей, превышающих по высоте уровень R_z , и 33 % неровностей в пределах высоты R_z . Поднутренные неровности возникают также при обработке ППД в режиме образования ЧРМР [9].

Таким образом, поверхности с ПН являются распространенной разновидностью (классом) рабочих поверхностей деталей и требуют глубокого изучения и исследования, определения параметров оценки, изыскания способов управления свойствами и контроля.

На рис. 2.10, *а* показан механизм образования ПН в виде остатков нароста. На краях рисок от режущих зерен наблюдаются микрозаусенцы в виде навалов и вспучивания металла. По данным Е.Н. Маслова и Н.В. Постниковой навалы, вспучивания и надрывы приросточных гряд неровностей наблюдаются при обработке сталей (ШХ15, Р18) и алюминиевых сплавов зернами электрокорунда, алмаза и эльбора. Электронно-микроскопические и оптические исследования подтвердили наличие на рисках размазанного по их поверхности металла, наволакивание верхних слоев металла в направлении резания, образование надрывов приканавочных напывов и местных нагромождений металла. Подобные явления возникают при доводке поверхностей шаржированными алмазным порошком притирами и свободным абразивом.

Рис. 2.11 иллюстрирует механизм возникновения ПН в виде надрывов гряд (следов обработки) при шлифовании (*а, б*) и алмазном вибровыглаживании в режиме образования ЧРМР (*в*). Возникновение задиров при скольжении по поверхности давящего алмазного зерна показано на рис. 2.11, *г*. Разновидности ПН на поверхности стали 12Х18Н10Т при отделочном точении показаны на рис. 2.12–2.15.

Проведенные микроскопические и фотографические исследования позволили выявить форму ПН, что послужило автору основой моделирования поверхностей с такими неровностями.

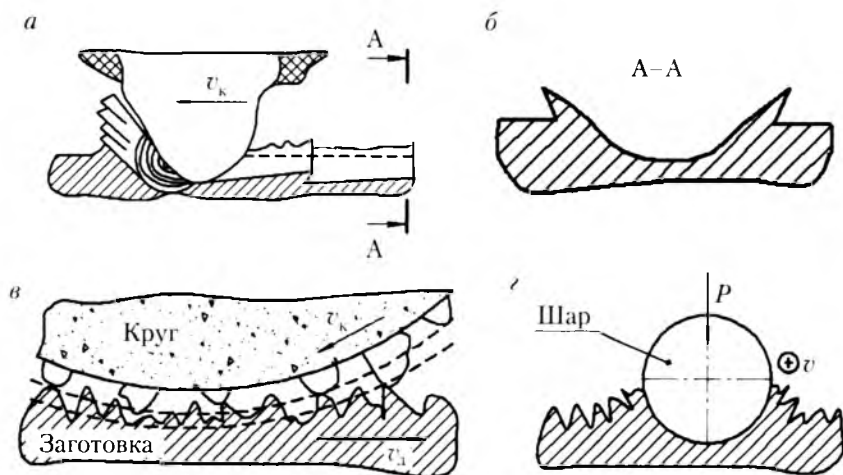


Рис. 2.10. Схемы возникновения ПН при шлифовании (а, б, в) и вибронакатывании шаром (z)

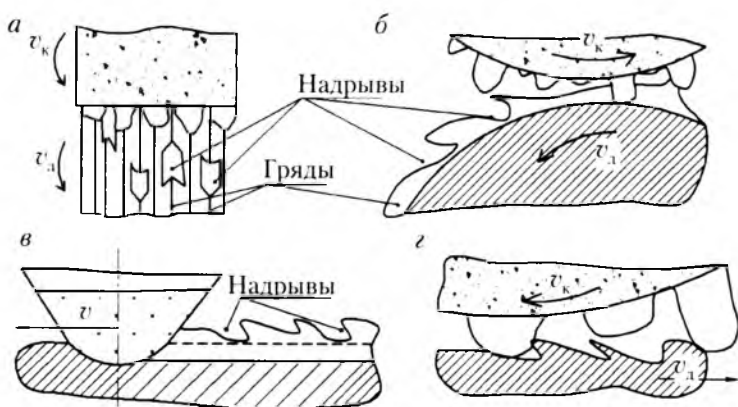


Рис. 2.11. Схемы возникновения ПН при абразивной обработке (а, б, z) и вибровыглаживании алмазным наконечником (в)

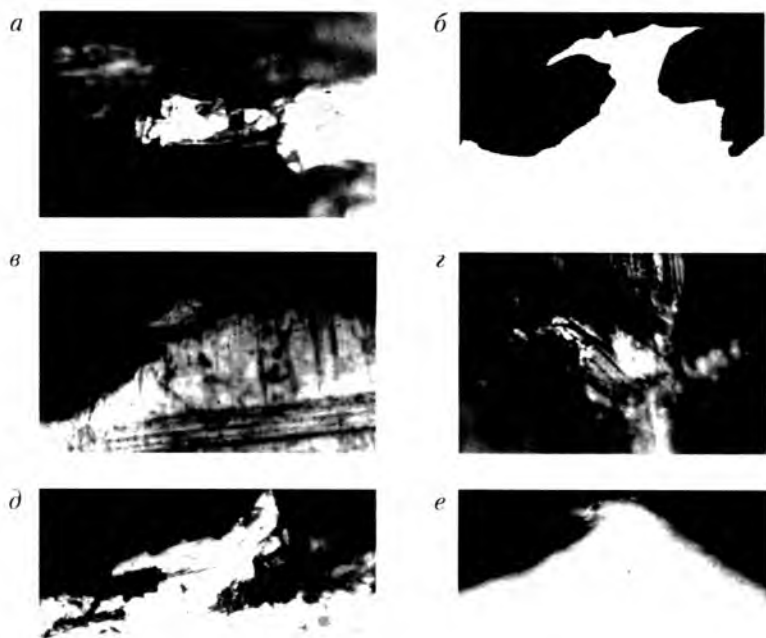


Рис. 2.12. Остаток нароста (*а, в*) и микрозаусенцы (*б, г, д, е*):
б, в, д, е — виды сбоку; *а, г* — виды сверху ($\times 200$)

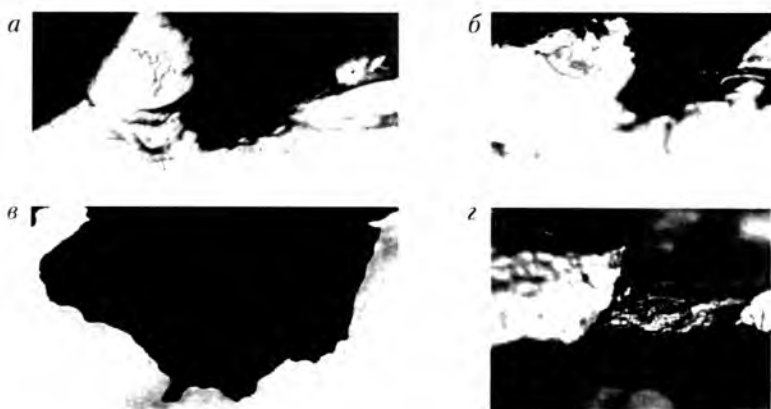


Рис. 2.13. Надрывы гряд неровностей:
а, б, в — виды сбоку; *г* — вид сверху ($\times 200$)



Рис. 2.14. ПН в виде задиры поверхности:
виды сбоку ($\times 200$)

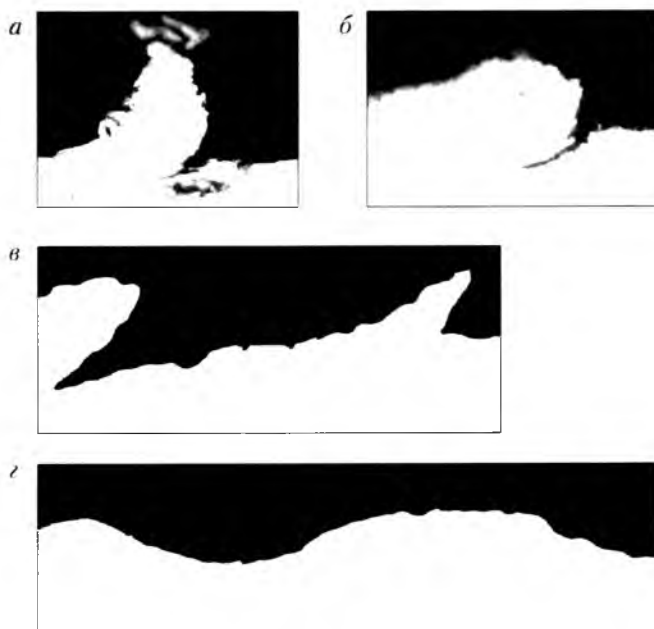


Рис. 2.15. Разновидности неровностей:
а, б, в — поднутренные неровности (виды сбоку); *z* — регулярные неровности
виброкатанной в режиме образования ПРМР профильными роликами по-
верхности ($\times 200$)

2.2.2. Моделирование поверхностей и классификация поднутренных неровностей

Поднутренные неровности первыми воспринимают воздействие сопряженных деталей и фактически предопределяют поведение рабочих поверхностей в соединениях в процессе всего периода эксплуатации изделий.

Исследованиями установлено, что в первом приближении ПН можно моделировать таким геометрическим образом, каким является наклонный конус. В качестве модели шероховатой поверхности принята базовая поверхность в виде плоскости, на которой статистически равномерно расположены наклонные конусы разной высоты h_n с различными углами поднутрения β_n (рис. 2.16). При этом базовая поверхность располагается на уровне Rz , а высота h_n характеризует превышение ПН над уровнем Rz .

Из рис. 2.16 следует, что наклонные конусы образуются вращением закрепленных в точках O_i , $i = 1, 2, \dots, 5$ прямых (ось 1), выпуклых кривых (оси 2, 5), вогнутых кривых линий (ось 3) вокруг наклоненной к базовой поверхности оси (ось 4). При этом линии огибают находящиеся на базовой поверхности контуры в виде круга, эллипса или любой другой замкнутой фигуры. Особый случай представляет собой вращение вокруг наклонной оси кривой параллельно самой себе, образующей выпукло-вогнутые и вогнуто-выпуклые (ось 4) или фасонные неровности (Б 5). На оси Б расположены ПН одностороннего действия, на оси В — неровности двустороннего действия (кроме В 5). Для сравнения на оси А представлены неровности без поднутрения с осью, перпендикулярной базовой поверхности (кроме А 4).

Предложенная модель позволяет сделать описание топологических особенностей микрогеометрии поверхности с ПН и осуществить математическое моделирование такой поверхности.

Топологические особенности микрогеометрии поверхностей с ПН и без них представлены на рис. 2.17. Из рис. 2.17, а следует, что на горизонтальных секущих плоскостях появляются «дырки» (места сечений неровностей), которые по мере приближения плоскостей к основанию меняют свое положение или исчезают, сливаясь с другими «дырками».

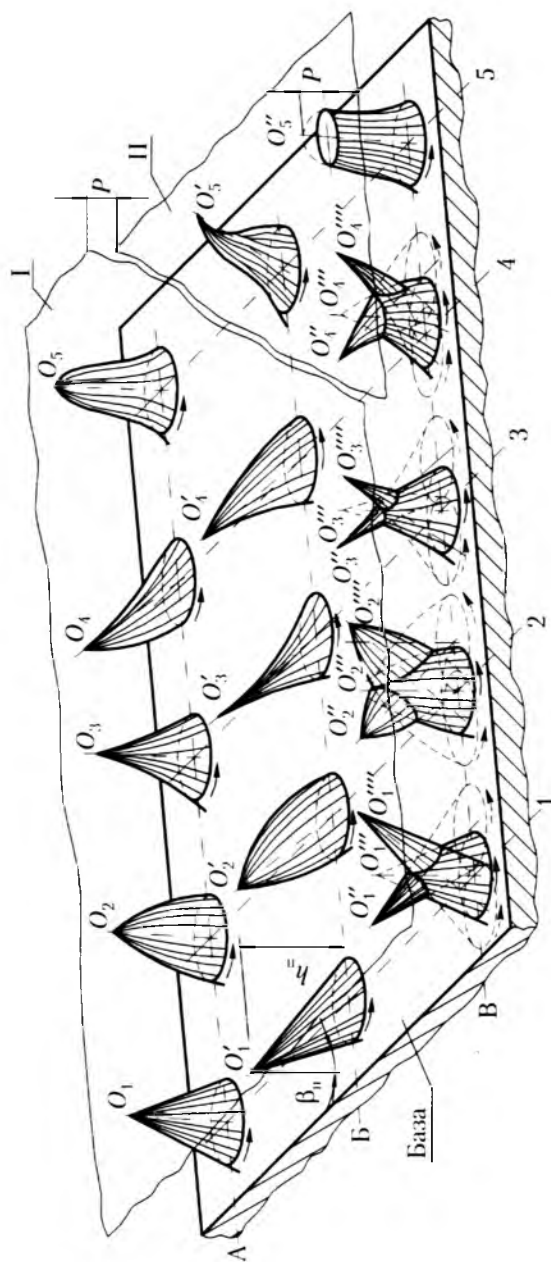


Рис. 2.16. Построение модели поверхности с ПН:

I, II — уровни расположения вершин O , неровностей А, Б, В;

1–5 — оси расположения оснований неровностей

Слияние «дырок» наблюдается при сечении плоскостями на разных уровнях ПН двустороннего, трехстороннего или четырехстороннего действия. Одна из ПН обладает трехсторонним действием и три «дырки» в сечении В сливаются в одну — в сечении Г. ПН одностороннего действия во всех сечениях образует одну «дырку», положение «дырки» от сечения к сечению меняется и площадь ее возрастает. На вертикальных секущих плоскостях по мере перемещения их слева направо «дырки» появляются, изменяют свое положение, приближаясь к контуру основной поверхности, затем сливаются с ним.

Описанными топологическими свойствами не обладает поверхность с неровностями без поднутрения (рис. 2.17, б). «Дырки» на горизонтальных секущих плоскостях возникают и не исчезают. Их площадь по мере приближения к основанию также увеличивается, но контуры всех «дырок» находятся внутри контура основания неровности. На вертикальных секущих плоскостях «дырки» вообще не возникают.

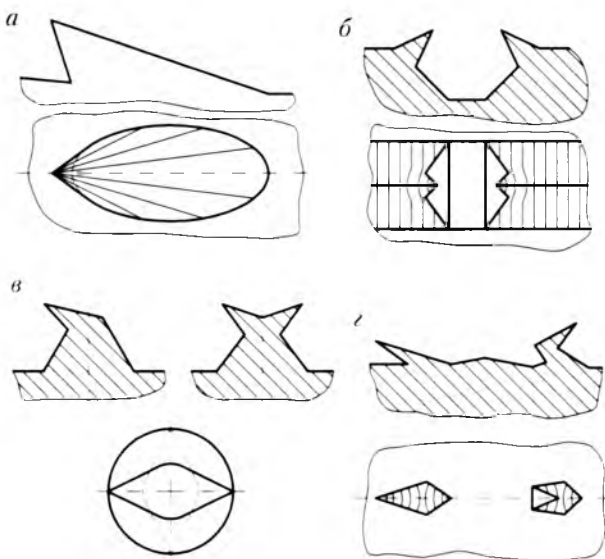


Рис. 2.18. Модели ПН в виде:

а — остатка нароста; б — надрыва гряды неровностей; в — заусенцев (одно-, двух-, трёх- и четырёхсторонние); г — задиров поверхности

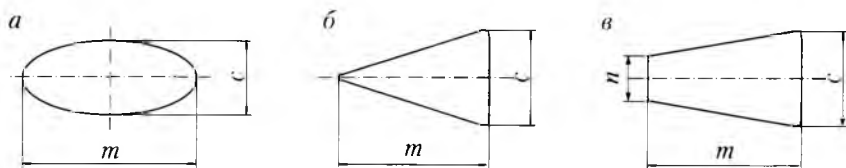


Рис. 2.19. Формы сечений ПН в виде:

a — эллипса ($m/c = 2...2.5$); *б* — треугольника ($m/c = 1.5...2$); *в* — трапеции ($m/c = 1.25...2$; $n = 0.5m$)

Из изложенного выше можно заключить, что поверхности с ПН по мере сближения сопрягаемых поверхностей имеют постоянно изменяющееся количество точек контакта, причем эти точки меняют свое положение по мере изнашивания и сближения поверхностей. Кроме того, поверхности с ПН при одинаковом количестве точек контакта имеют значительно меньшую фактическую площадь контакта A_f по сравнению с поверхностью, обладающей неровностями без поднутрения. Это связано с особенностями формы ПН, которые имеют вертикальные сечения в виде треугольников с одним тупым углом у основания и значения размеров горизонтальных сечений меньше, чем значения размеров сечений обыкновенных неровностей, имеющих вертикальные сечения в виде треугольников с двумя острыми углами у оснований. «Дырки» на вертикальных секущих плоскостях и переменное их положение свидетельствуют об особенностях поверхностей с ПН, проявляющихся при взаимодействии их в прецизионных соединениях и с различными средами.

Разновидности формы ПН представлены на рис. 2.16. Некоторые модели ПН иллюстрирует рис. 2.18. Типовые формы поперечных сечений ПН показаны на рис. 2.19.

Классификация ПН и их количественные соотношения отражены в табл. 2.4. Приведенные классификация и примерные количественные соотношения ПН позволяют определять количество различных неровностей в общем числе ПН, приходящемся на единицу площади поверхности. Количественные соотношения неровностей обеспечивают также возможность более точно определять фактическую площадь контакта A_f поверхностей и относительную опорную площадь $F_{оп}$ и реально прогнозировать их поведение в условиях эксплуатации деталей и соединений.

Таблица 2.4

Разновидности ПН и их статистическое распределение

Критерий классификации	Разновидности ПН и их относительное количество
Источник возникновения	а – остатки нароста; б – микрозаусенцы; в – надрыв гряд неровностей; г – задиры
Значение превышения величины h_n над уровнем R_z	а – большие: $h_n = (0,3...0,4)R_z$, 10 %; б – средние: $h_n = (0,2...0,3)R_z$, 20 %; в – малые: $h_n = (0,1...0,2)R_z$, 30 %; г – очень малые: $h_n = (0...0,1)R_z$, 40 %
Угол β_n поднутрения	а – с очень маленьким поднутрением, $\beta_n = 0...2^\circ$, 35 %; б – с малым поднутрением, $\beta_n = 2...7^\circ$, 25 %; в – со средним поднутрением, $\beta_n = 7...12^\circ$, 25 %; г – с большим поднутрением, $\beta_n = 12^\circ$, 15 %
Угол β_3 заострения	а – тупые, $\beta_3 = 58^\circ$, 35 %; б – заостренные, $\beta_3 = 53...58^\circ$, 25 %; г – очень острые, $\beta_3 \leq 48^\circ$, 15 %
Форма профиля	а – прямые, ПН-1, 45 %; б – выпуклые, ПН-2, 25 %; в – вогнутые, ПН-3, 20 %; г – выпукло-вогнутые, ПН-4, 5 %; д – вогнуто-выпуклые, ПН-5, 5 %
Форма поперечного сечения	а – эллипсные, С-1, $m/c = 2...2,5$; 23 %; б – треугольные, С-2, $m/c = 1,5...2,0$; 48 %; в – трапециевидные, С-3, $m/c = 1,25...2,0$; $n \approx 0,5m$; 29 %

Примечание. Характеристики поперечных сечений ПН даны в соответствии с рис. 2.19.

Исследованиями установлено, что приканавочные наплывы поверхностей с ЧРМР являются регулярными поднутренними неровностями (РПН), которые в случае необходимости можно создавать вибронакатыванием и алмазным вибровыглаживанием поверхностей.

2.2.3. Характер взаимодействия поверхностей с твердыми телами, эластиком, газом и жидкостью

Взаимодействие твердых тел в условиях эксплуатации машин, приборов и аппаратов — наиболее часто встречающийся в практике случай. Оно зависит от установленного И.В. Крагельским ряда факторов. Одним из наиболее существенных является геометрический фактор, характеризуемый отношением глубины внедрения h , или величины сжатия и радиуса r единичной неровности: h/r . Эта характеристика позволяет различать упругий контакт, пластический и микрорезание. Другим существенным фактором является физико-химический, характеризуемый отношением тангенциальной прочности молекулярной связи τ и предела текучести σ_T материала основы.

Создаваемые при взаимодействии твердых тел напряжения зависят прежде всего от площади фактического контакта рабочих поверхностей деталей. Контакт реальных поверхностей деталей можно представить четырьмя моделями (рис. 2.20). Модель контактирования по площади поверхности приблизительно реализуется в подвижных соединениях при использовании металлоплакирующих смазок и приработочных покрытий, обеспечивающих работу в режиме избирательного переноса. По данным Д.Г. Гаркунова

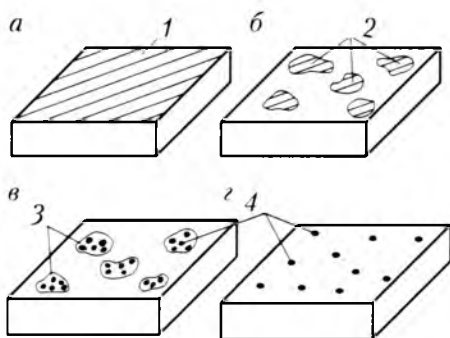


Рис. 2.20. Модели контакта поверхностей:

a — контактирование по площади; b — макроконтрактирование; v — микроконтрактирование; z — единичные контакты (1 — контактирующая поверхность; 2 — контактирующие участки поверхности; 3 — контактирующие зоны точек; 4 — контактирующие точки)

и А.А. Полякова, режим избирательного переноса обеспечивает взаимодействие твердых тел при площадях фактического контакта на 1,5–2 порядка больших, чем площади при граничном трении.

Макроконтрактирование присуще различным соединениям деталей машин и приборов, работающих в условиях централизованного смазывания, когда смазочный материал (масло) подается непрерывно и под давлением. Эта модель реализуется при описанных условиях смазывания, например в нагруженных подвижных соединениях с использованием подшипников из антифрикционных сплавов на основе олова и свинца (баббитов), отличающихся хорошей прирабатываемостью, низкой температурой заливки (573...693 К) и размягчения и малым коэффициентом трения.

Модели микроконтрактирования и единичного контакта реализуются в прецизионных соединениях, в которых ограничен линейный (размерный) приработочный и эксплуатационный износ, недопустимо повышение уровня загрязненности зазоров, осуществляется взаимодействие поверхностей в условиях сухого трения или ограниченного смазывания материалом, который не подается под давлением, не перемещается и не заменяется в период эксплуатации изделий.

Рабочие поверхности с ПН, превышающими уровень R_z , крайне нежелательны для прецизионных деталей и соединений. Наличие таких неровностей на контактирующих поверхностях твердых тел при их взаимодействии (рис. 2.21, *а*) приводит к малой фактической площади контакта, повышенным напряжениям в контакте, микрорезанию поверхности контртела или разрушению неровностей, что влечет большой размерный износ деталей и загрязнение зазоров подвижных соединений со всеми вытекающими из этого отрицательными последствиями.

Как видно на схеме (рис. 2.21, *б*), эластик под действием силы от натяга и от пружин вследствие своей эластичности вдавливается в пространство между неровностями твердого тела и этим способствует более агрессивному действию ПН. В данном случае агрессивными оказываются не только неровности, превышающие по высоте значения R_z , но и ПН, не выходящие за пределы величины R_z .

В результате воздействия ПН поверхности твердого тела детали уплотнительных устройств из резины, эластомера и других эластиков быстро изнашиваются, что приводит к повышенному уровню

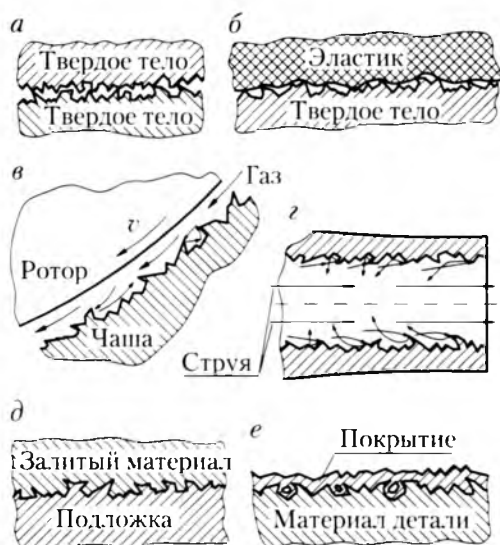


Рис. 2.21. Схемы взаимодействия с ПН:

a — твердых тел; *б* — твердого тела с эластиком; *в* — твердого тела с газом и жидкостью; *г* — твердого тела с кумулятивной струей; *д* — деталей неразъемного соединения (залитка и напыление жидкого металла); *е* — твердого тела и покрытия

загрязненности и выходе изделий из строя из-за потери гидро- и пневмоплотности подвижных соединений.

Отрицательно воздействие поверхности с ПН твердых тел на волокнистую массу и, в частности, на уплотнительные кольца из фетра и войлока. Р.Г. Махкамов описал взаимодействие поверхности твердого тела, обладающей пилообразными субмикронеровностями с волокнистой массой хлопка. Процесс этого взаимодействия характеризуется деформированием продольных волокон, захватом и перерезанием такими неровностями поперечных волокон, разрушением (рассечением) волокнистой массы. Применительно к деталям уплотнительных устройств из фетра и войлока описанные явления способствуют быстрому изнашиванию колец, потере гидроплотности и повышению уровня загрязненности подвижных соединений.

Особенности взаимодействия шероховатых поверхностей с твердыми телами, эластиком и волокнистой массой хорошо подчерки-

ваются значениями коэффициента трения. При наличии на рабочих поверхностях деталей ПН значения его возрастают (см. п. 2.4.3), что отрицательно влияет на износостойкость деталей, но положительно сказывается, например, на работе тормозных устройств. Наличие ПН на поверхностях тормозных барабанов в начальный период работы тормозов приводит к постоянному воспроизводству подобной микрогеометрии на контактирующих поверхностях и обеспечивает надежную работу тормозных устройств на протяжении всего периода их эксплуатации.

Взаимодействие поверхностей с ПН с газом, жидкостью и струей устройств кумулятивного действия иллюстрирует рис. 2.21, в, г, из которого можно сделать вывод, что в результате взаимодействия с поднутренными неровностями поверхностей газы и жидкости в зазорах, например аэро- и гидростатических подвесов (подшипников), перемещаются с перемешиванием между соседними слоями, что приводит к отклонению от их ламинарного перемещения и нестабильной работе подвесов гироскопов и подшипников оборудования.

Подобная картина наблюдается также в трубках устройств кумулятивного действия, когда возникающие в результате столкновения периферийных слоев струи с ПН снижают ламинарность ее течения и кумулятивность действия. При работе подвесов и подшипников в аэро- и гидродинамическом режиме на поверхностях опор (подшипников) ПН также не допускаются по изложенным выше причинам. На поверхностях вращающихся роторов и валов допускаются ПН с высотой, не превышающей уровень R_z , что способствует лучшему нагнетанию газа (жидкости) в зазор и созданию необходимой подъемной силы при меньшей частоте вращения ротора (вала).

На рис. 2.21, д показано сечение соединения двух материалов. Из рассмотрения схемы можно сделать вывод, что наличие ПН на контактирующих поверхностях деталей положительно сказывается на прочности неразъемного соединения, так как при этом за счет заклинивания материалов во впадинах ПН механическое сцепление поверхностей возрастает. Такое явление имеет место при создании подшипников скольжения заливкой фрикционных бронз, баббитов, эпоксидных компаундов и других материалов в жидком состоянии; напылении металлов; оплавлении на металле

дисперсных термопластичных полимерных материалов, других пластмасс. Наличие ПН на поверхностях способствует повышению прочности соединений деталей с натягом, обеспечиваемых пластическим деформированием тонкостенных втулок в холодном состоянии (например, при дорновании) или обработкой ППД в запрессованном состоянии, напрессовкой тепловым воздействием (нагрев или охлаждение одной из деталей).

Другая картина наблюдается при химическом и электролитическом нанесении покрытий (рис. 2.21, *е*). Слой металлического покрытия растет перпендикулярно каждой элементарной поверхности микронеровностей детали. При этом отмечается замедленный рост слоя покрытия во впадинах неровностей поверхности. В результате при наличии ПН на покрываемых поверхностях возможны случаи, когда боковые слои покрытия из-за близости поднутренных выступов смыкаются и перекрывают впадины, что приводит к появлению пустот; снижению качества покрытия, несущей способности рабочих поверхностей и коррозионной стойкости деталей. Кроме того, высокий уровень загрязненности поверхностей заготовок продуктами обработки снижает адгезию покрытия с основным металлом.

Положительное влияние рабочие поверхности деталей с ПН оказывают в электрических стыковых постоянно замкнутых контактах (разъемах), так как ПН способствуют улучшению электрического контакта деталей за счет надежного их прохода через пленки и загрязнения на контактирующих поверхностях.

2.2.4. Способы оценки микрогеометрии поверхностей с ПН и их обеспечение

Существующие щуповые способы контроля шероховатости поверхностей рассчитаны на обычные неровности с углами α наклона образующих до 20° , в ряде случаев до 30° и даже до 40° [5, 9, 11]. Они основаны на фиксации перпендикулярного воздействия шероховатой поверхности на щуп и не реагируют на ее воздействие в тангенциальном направлении, в котором поверхности деталей перемещаются относительно друг друга, например в условиях трения и изнашивания.

Щуповые приборы для реализации существующих способов контроля оснащены щупами в виде игл, имеющих конические концы с углами конуса $90...100^\circ$ и радиусом его скругления от 2,5 до 12,5 мкм (при изнашивании иглы — до 30 мкм). Это приводит к искажению фиксируемого прибором профиля поверхности, что подтверждается схемами (рис. 2.22). Из схем следует, что зафиксированный прибором профиль микрогеометрии поверхности (рис. 2.22, б) искажен в сравнении с действительным (рис. 2.22, а) как по высоте поднутренной неровности 4 ($h_{\phi} > h_n$), так и по ее форме; искажена также форма неровности 1. Можно отметить, что ПН поверхности как таковые вообще не фиксируются существующими способами и приборами.

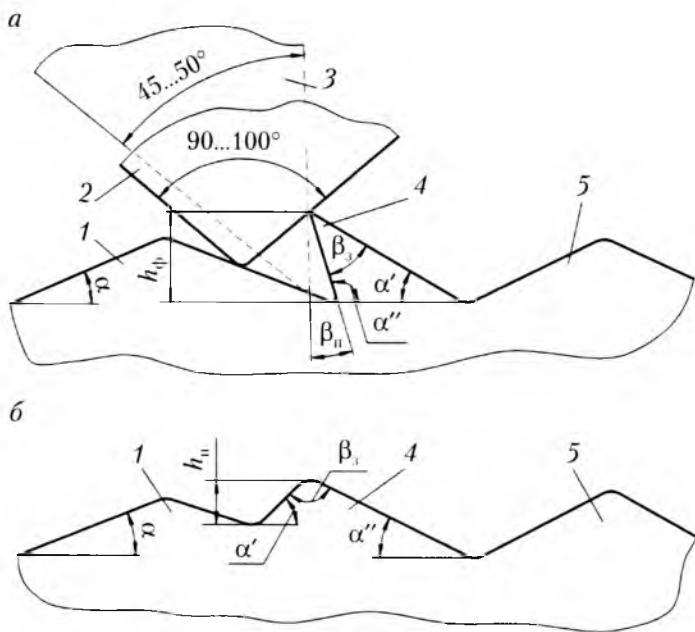


Рис. 2.22. Искажение профиля микрогеометрии поверхности при контроле ее существующим щуповым способом:

а — действительный профиль и взаимодействие его с ощупывающей иглой; б — зафиксированный прибором на профилограмме профиль; 1, 5 — обычные неровности; 2 — щуп профилографа-профилометра; 3 — положение щупа с углом конуса 45...50°; 4 — ПН

Предложенные автором новые способы контроля микрогеометрии поверхности с ПН (А.с. СССР 1226008, патент РБ 3936) основаны на регистрации тангенциального воздействия контролируемой поверхности на щуп в виде иглы (рис. 2.23, *з*), имеющей конический конец с углом конуса $45...50^\circ$ и радиусом его скругления 2 мкм (при изнашивании иглы — до 10 мкм), а способ контроля шероховатости (патент РБ 4096) — на определении силы поджима щупа-магнита к поверхности стальных деталей с различной микрогеометрией.

Значения параметров ПН: h_n , β_n , β_z (рис. 2.23, *б*) приведены в табл. 2.4, $\alpha_{cp} \approx 30^\circ$ [5, 9]. Из рис. 2.23, *в* имеем $\beta_n = 90^\circ - \alpha - \beta_z$.

В первых двух способах щуп имеет возможность отклоняться по радиусу $r_{ш}$ в направлении, обратном направлению трассирования (рис. 2.23, *з*) или под углом к нему. При трассировании по поверхности с обычными неровностями щуп не воспринимает перпендикулярного воздействия поверхности и от действия силы трения отклоняется на угол α_1 . При встрече с ПН он под воздействием силы отклоняется в тангенциальном направлении на значительно больший угол α_2 . Углы отклонения щупа преобразуются первичным преобразователем в электрические сигналы. Среднее значение угла α_1 характеризуют сигналы, не фиксируемые при оценке микрогеометрии поверхности (U_n , I_n) и определяющие уровень порога (рис. 2.23, *д*). Сигналы, превышающие уровень порога, фиксируются и соответствуют определенным значениям α_2 . По углам α_1 и α_2 можно вычислять значения h_n из выражений:

□ при точном расчете

$$h_n = r_{ш} - (1 - \cos \alpha_2) - Rz, \quad (2.1)$$

□ при приближенном (без снятия профилограммы и определения величины Rz)

$$h_n \approx r_{ш}(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (2.2)$$

В пределах изменения значений α_1 и α_2 можно считать, что $\cos \alpha_1 \approx 1 - \alpha_1^2/2$. Тогда формулы (2.1) и (2.2) примут вид

$$h_n \approx \frac{r_{ш}\alpha_2^2}{2} - Rz, \quad h_n \approx \frac{r_{ш}(\alpha_2^2 - \alpha_1^2)}{2}.$$

Количество электрических сигналов, превышающих уровень порога, характеризует число встреч щупа N_b с ПН на определенной длине трассирования.

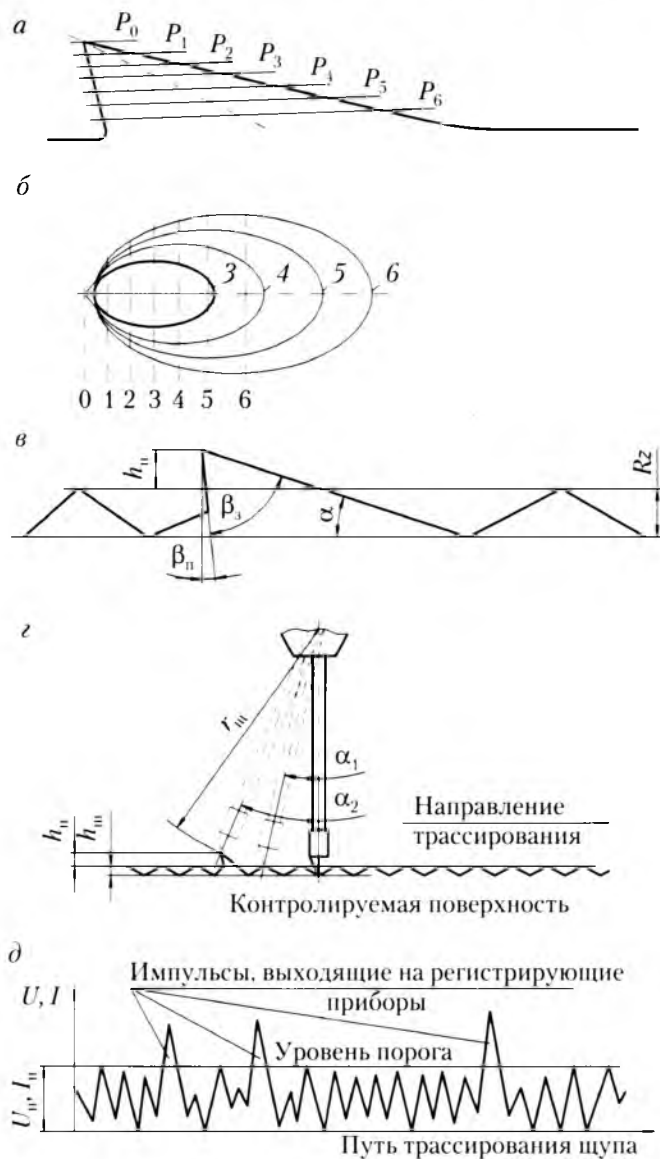


Рис. 2.23. Схемы ПН (*a*), ее сечения на уровне P_3 и контуров сечений на уровнях P_0-P_2, P_4-P_6 (*б*), профиля поверхности с ПН (*в*), способа оценки микрогеометрии поверхности (*г*) и записи электрических импульсов (*д*)

Эти способы можно осуществить с помощью предложенных автором устройств (А.с. 1226008, 1665216). Конструкция устройства с пьезоэлектрическим преобразователем показана на рис. 2.24. Датчиковая система (рис. 2.24, *а*) состоит из щупа 2, первичного преобразователя 3, контактов 4, проводов 5, подвижного упора 6, гайки 7, державки 9, вывода 10 одного из контактов на массу, пружины 11, втулки 12 с прорезью П, корпуса 13. Система устанавливается державкой 9 в резцедержатель 8 токарно-винторезного станка, в патроне которого закреплена контролируемая деталь 1. Корпус 13 подпружинен, щуп 2 выполнен двухкоординатно-подвижным, а первичный преобразователь 3 является датчиком модуля вектора отклонения щупа.

Первичный сигнал от первичного преобразователя 3 усиливается отсчетно-регистрирующей системой (рис. 2.24, *б*) устройства. На блок-схеме системы представлены: дифференциальный усилитель 14, сопротивление 15, конденсатор 16, задатчик уровня порога 17, компаратор 18, триггер Шмитта 19, регистрирующий прибор 20 (счетчик импульсов, соответствующих поднутренным неровностям; самописец и т.д.), цифровой индикатор 21, показывающий прибор 22, интегральный усилитель 23.

В устройстве в качестве первичного преобразователя использован трубчатый пьезоэлемент 3 (рис. 2.24, *в*) с обкладками в виде напыленного металла толщиной 0.01 мм. При этом на цилиндрической поверхности предусмотрены ленточки без напыленного слоя. Обкладки подключены к контактам 4, один из которых соединен с усилителем 14, другой — выведен проводом 10 на массу. Устройство настраивается и тарируется по образцам. В зависимости от измерительных средств снимаемые с устройства электрические сигналы могут характеризоваться током I (мкА) или напряжением U (мВ).

Устройство работает следующим образом. Щуп 2 перемещением резцедержателя 9 станка подводится до соприкосновения с контролируемой поверхностью детали 1. Необходимая сила поджима щупа к поверхности обеспечивается предварительным сжатием пружины 11 при вращении упора 6. На нормальные к контролируемой поверхности перемещения щупа 2 первичный преобразователь 3 не реагирует, так как эти перемещения направлены вдоль его оси, а корпус 13 подпружинен и свободно переме-

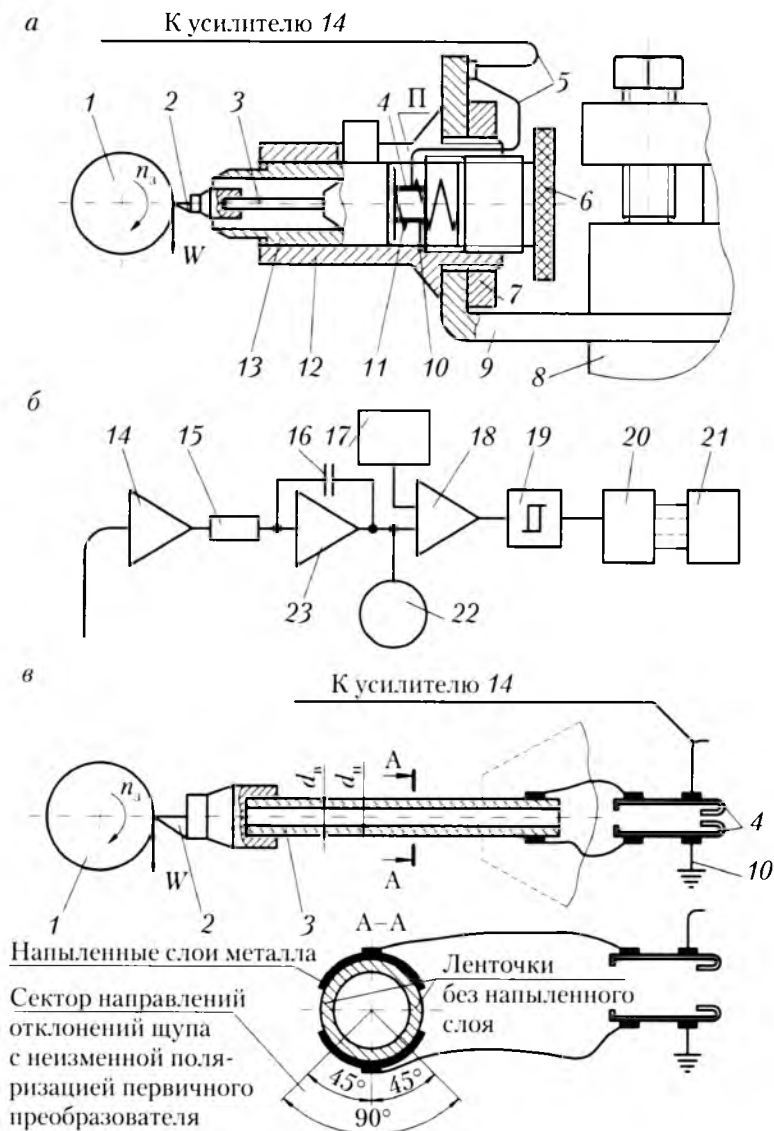


Рис. 2.24. Устройство с пьезоэлектрическим преобразователем:
а — датчиковая система; *б* — блок-схема электронной системы;
в — пьезоэлектрический преобразователь

щается в осевом направлении во втулке 12. При вращении детали 1 на щуп 2 начинают действовать с силой W поднутренные неровности контролируемой поверхности, отклоняя его как в направлении вращения n_3 детали, так и в перпендикулярных направлениях при огибании игольчатым щупом ПН. При этом направление суммарного отклонения щупа часто не совпадает с направлением относительного перемещения и находится под углом до 45° к нему.

При тангенциальных смещениях щупа 2 в первичном преобразователе 3 генерируются электрические заряды (сигналы), пропорциональные смещению щупа. С контактов 4 электросигналы по проводам 5 поступают на усилитель 14 отсчетно-регистрирующей системы. По показаниям приборов можно определить число N_b встреч щупа с ПН и в случае необходимости вычислить значение h_n .

На рис. 2.25 показана установка на базе токарно-винторезного станка мод. 1А616, оснащенного описанным выше устройством. В качестве щупа использована игла головки звукоснимателя ПГЗК-661, отрезанная с боковой стороны капронового наконечника и приклеенная под углом $62,5...65^\circ$ (см. рис. 2.24, в) к его торцу. Для первичного преобразователя применен трубчатый пьезоэлемент указанной головки с $d_n = 1,3$ мм; $d_b = 0,9$ мм; $l = 15$ мм; толщина обкладок около 0,01 мм. Секторное расположение обкладок обеспечивает реагирование пьезоэлемента при отклонении щупа в направлении, отличающемся от направления трассирования на 45° , без изменения поляризации. Для ориентации пьезоэлемента в направлении трассирования служит втулка 12, в прорезь П которой своим флажком входит корпус 13 (см. рис. 2.24, а). Втулка 12 может поворачиваться в отверстии державки 9 и закрепляться в повернутом положении гайкой 7, что обеспечивает ориентацию пьезоэлемента 3 относительно ожидаемого направления трассирования. На установке контакты 4 подключались посредством проводов 5 и выхода 10 к клеммам усилителя постоянного тока И37, который настраивался на 4-кратное усиление генерируемого первичным преобразователем (пьезоэлементом) тока. Усиленное в 4 раза значение тока измерялось подключенным к усилителю микроамперметром М265М. С помощью электронносчетных частотомеров и ЧЗ-33 и ЧЗ-38 обеспечивался счет количества электрических сигналов в единицу времени, что соответствовало

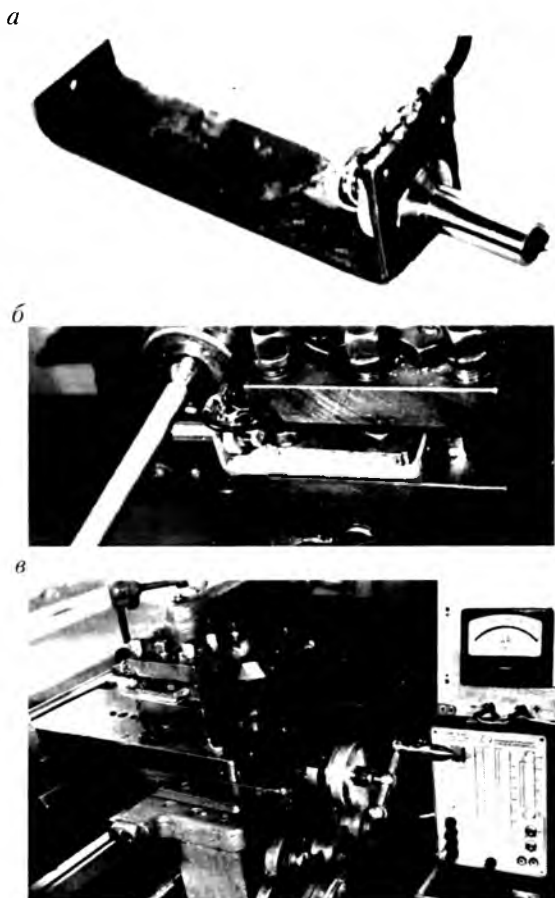


Рис. 2.25. Установка для оценки микрогеометрии поверхности:
а — датчиковая система; *б* — размещение ее в резцедержателе станка;
в — общий вид

определенному пути трассирования. Записывающий прибор и другие элементы устройства также были выбраны из номенклатуры серийно выпускаемых стандартных приборов.

В табл. 2.5 представлены показания устройства (в микроамперах) при оценке на описанной выше установке микрогеометрии наружной цилиндрической поверхности ползунов (сталь 12Х18Н10Т), обработанной тремя способами с обеспечением $Ra = 1,6$ мкм.

Из табл. 2.5 можно сделать вывод, что обточенная и шлифованная поверхности имеют ПН, обкатанная — не имеет. При этом на шлифованной поверхности их больше, на обточенной — меньше, но они имеют увеличенную высоту по сравнению с высотой ПН шлифованной поверхности.

Таблица 2.5

Показания устройства при контроле микрогеометрии поверхностей с различной обработкой

Показатель	Способ обработки поверхности		
	Точение	Шлифование	Накатывание
Уровень порога отклонения щупа от воздействия шероховатости поверхности, мкА:			
по прибору	25	26	24
фактически	6.2	6.5	6.0
Наличие отклонения щупа на величину, превышающую уровень порога	Да	Да	Нет
Максимальное отклонение щупа, мкА:			
по прибору	156	122	24
фактически	39	36.5	6.0
Число тангенциальных отклонений щупа, превышающих по значению уровень порога на длине трассирования 1 мм в направлении:			
прямым	4	6	—
перпендикулярном	6	6	—
Примерное количество тангенциальных отклонений щупа на площади поверхности 1 мм ² (произведение чисел отклонений щупа при трассировании в прямом и перпендикулярном направлениях)	24	36	—

На рис. 2.26 представлена схема устройства с датчиковой системой индуктивного действия (А.с. 1682145), базой которого является профилограф-профилометр мод. 252. Датчиковая система размещена в корпусе 8 датчика прибора, опирающегося на контролируемую поверхность детали 1 пятой крышки-опоры 3. Щуп (игла) 2 устройства размещена на штоке 15, который входит своим хвостом

виком в отверстие рычага 14 и подпружинен пружиной 16. Для упрощения тарирования прибора отношение плеч рычага l_1/l_2 (в нерабочем состоянии) следует принимать равным 0,61...0,64. При встрече шупа 2 с поднутренными неровностями рычаг поворачивается на оси 13 кронштейна 12 и своим коротким концом (плечо l_1) воздействует на иглу 4 профилографа-профилометра, поднимая или опуская ее пропорционально отклонениям шупа в направлении его трассирования. Осевые колебания иглы 4 в процессе трассирования шупа 2 по поверхности детали 1 через коромысло 11 и опору 10 передаются на якорь 9, который поворачивается в ту или другую сторону. Колебания якоря меняют воздушные зазоры между якорем и Ш-образным сердечником и вызывают изменения напряжения на выходе дифференциального трансформатора. Полученные изменения напряжения усиливаются электронным блоком, на выход которого подключается записывающий или показывающий прибор. Пружины 6 предназначены для компенсации неуравновешенности плеч якоря 9. С помощью винта 5 можно регулировать положение крышки-опоры при отstopоренных винтах ее крепления. Экран 7 предохраняет магнитную систему датчика от загрязнения. Описанное устройство позволяет производить

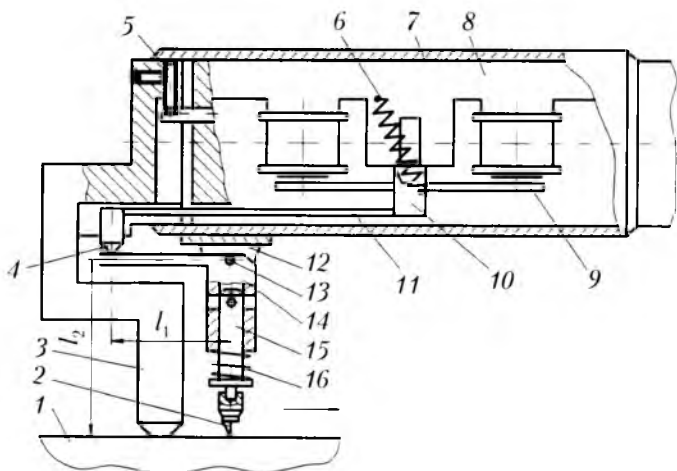


Рис. 2.26. Схема устройства индуктивного действия на базе профилографа-профилометра мод. 252

контроль различных поверхностей, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию.

Для контроля микрогеометрии цилиндрических поверхностей при трассировании щупа в поперечном направлении следует использовать приспособление (рис. 2.27), позволяющее снимать на стандартном профилографе-профилометре профилограммы поперечной шероховатости цилиндрических поверхностей и обеспечивать запись электросигналов, пропорциональных отклонению щупа при встрече его с ПН.

Приспособление устанавливается основанием 1 на стол стойки профилографа-профилометра мод. 201 или 252. Цилиндрической детали 4, установленной с помощью справки 5 в центрах между стойкой 2 (плавающий центр) и корпусом редуктора 3 (жесткий центр), сообщается вращательное движение от привода 10 (электродвигатель типа СД-2, $n = 2 \text{ мин}^{-1}$) через червячный редуктор с передаточным отношением 1:60. Датчик 6 прибора вместе со щупом и его подвеской находится в неподвижном состоянии и пятой крышки-опоры опирается на нож 7, положение которого по высоте регулируется в зависимости от диаметра контролируемой детали 4 перемещением гаек 8 по резьбе стойки 9.

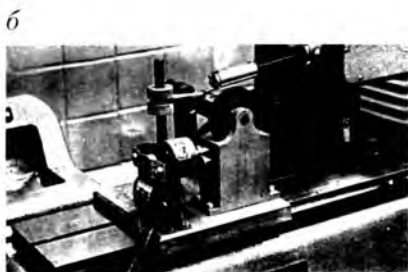
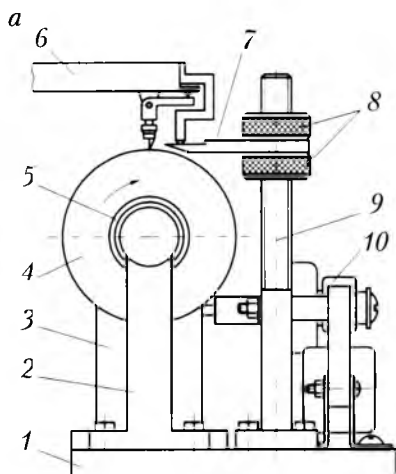


Рис. 2.27. Приспособление для оценки микрогеометрии цилиндрических поверхностей в поперечном направлении:

а — схема; б — общий вид

При снятии профилограмм поперечной шероховатости на профилографе-профилометре с помощью описанного приспособления и обычного датчика (без качающегося рычага) следует исходить из условия: чем больше окружная скорость образца v_o в приспособлении (аналогично скорости перемещения иглы профилографа-профилометра v_n), тем меньше горизонтальное увеличение Γ_y профилограмм при постоянной скорости перемещения ленты для записи. Горизонтальное увеличение профилограмм поперечной шероховатости определяется отношением v_n/v_o по формуле

$$\Gamma_y = M_r v_n / v_o = M_r r_n / \pi D_o n_o,$$

где M_r — масштаб горизонтального увеличения при установленной скорости перемещения датчика на мотоприводе; D_o — диаметр контролируемой поверхности образца, м; n_o — частота вращения детали, мин^{-1} .

Подобным образом можно подобрать записи электросигналов на ленте записывающего прибора при оценке микрогеометрии поверхностей, обладающих ПН, с помощью профилографа-профилометра. Контроль поверхностей в двух направлениях позволяет увеличить полноту информации об их качестве и обеспечить определение важнейших площадных характеристик микрогеометрии поверхностей.

По третьему способу о шероховатости поверхности судят по изменению силы поджима щупа-магнита к поверхности: чем больше неровности шероховатости по высоте, тем меньше сила поджима щупа и наоборот.

2.2.5. Математическая модель поверхности и имитационное моделирование ПН

Описанными выше способами контроля качества поверхности с ПН и устройствами (рис. 2.24 и 2.26) можно определять величину N_v и вычислять по формулам (2.1), (2.2) значение h_n . Но на эксплуатационные свойства поверхностей оказывают влияние углы поднутрения β_n , плотность расположения ПН на единице площади поверхности N_n и сечения N_p , площадь фактического контакта A_p поверхностей в зависимости от уровня p их сближения, относи-

тельная опорная площадь $F_{\text{оп}}$ и другие параметры микрогеометрии поверхностей.

Непосредственное выявление значений указанных и других параметров микрогеометрии поверхностей с ПН с помощью разрезки деталей и изготовления микрошлифов занимает много времени и ведет к утрате деталей. Описание такой поверхности с помощью двумерных рядов Фурье оказалось невозможным, так как в местах расположения ПН функция, описывающая поверхность, многозначная. Топологические методы описания микрогеометрии подчеркивают особенности поверхностей с ПН (см. рис. 2.17), но также не позволяют решить поставленную задачу. Поэтому предложены статистическая и описанная ниже математическая модели поверхности с ПН, обеспечивающие достаточно полное и информативное описание микрогеометрии поверхностей деталей.

Обобщенные данные анализа большого числа микрошлифов (см. табл. 2.4) показывают, что случайные величины $h_{\text{п}}$ и $\beta_{\text{п}}$ (рис. 2.28) подчиняются экспоненциальному закону распределения с плотностью вероятности соответственно

$$p(h_{\text{п}}) = \lambda_{\text{н}} \exp(-\lambda_{\text{н}} h_{\text{п}}), \quad p(\beta_{\text{п}}) = \lambda_{\text{в}} \exp(-\lambda_{\text{в}} \beta_{\text{п}}), \quad (2.3)$$

где $\lambda_{\text{н}}$ и $\lambda_{\text{в}}$ — параметры закона распределения, для которых экспериментально установлено [9]:

$$\lambda_{\text{н}} = (6,7 \pm 0,5)R_z, \quad \lambda_{\text{в}} = (8,2 \pm 0,5)R_z.$$

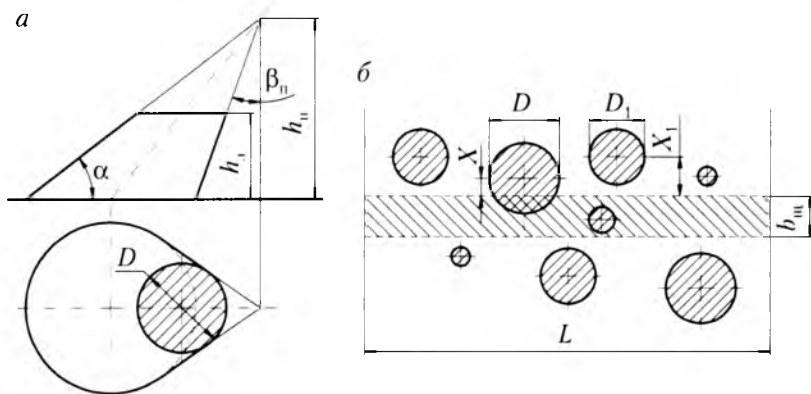


Рис. 2.28. Характеристики модели ПН (а) и схема определения числа встреч $N_{\text{в}}$ щупа с ПН (б)

При ощупывании шероховатой поверхности с ПН устройством, щуп которого движется параллельно базе на расстоянии h_3 от нее, число его встреч с ПН определяется вероятностью сложного события, являющегося совмещением двух других случайных независимых событий. Первое состоит в том, что сечение ПН эквидистантной секущей, отстоящей от базы на расстоянии h_3 , дает круг диаметром D (рис. 2.28, *a*), а второе — центр этого круга находится на расстоянии $X \leq D/2$ от трассы щупа. Вероятность первого события определяется функцией плотности вероятности $p(d)$, второго — отношением площади полосы эквидистантной секущей плоскости шириной $(D + b_{\text{щ}})$ и длиной L к площади квадрата со стороной L (здесь L — длина трассы, $b_{\text{щ}}$ — приведенная ширина щупа). Тогда

$$N_{\text{в}} = N_h \int [(D + b_{\text{щ}})L/L^2] p(d) d = N [M(D) + b_{\text{щ}}] / L, \quad (2.4)$$

где $N_{\text{в}}$ — число встреч щупа с ПН на длине трассы L ; N_h — число ПН, пересекаемых эквидистантной секущей плоскостью, на площади, равной L^2 ; $M(D)$ — математическое ожидание диаметров кругов в секущей плоскости.

Приведенная ширина $b_{\text{щ}}$ при использовании пластинчатого щупа (рис. 2.29, *a*) равна его ширине. При использовании описанного выше игольчатого щупа значение $b_{\text{щ}}$ определяется в соответствии со схемой (рис. 2.29, *б*) из уравнения

$$(b_{\text{щ}}/2)^2 + (r_1 - \Delta_{\text{п}})^2 = (b_{\text{щ}}^2/4) + r_1^2 - 2r_1\Delta + \Delta_{\text{п}}^2 = r_1^2,$$

где r_1 — радиус скругления конуса щупа; $\Delta_{\text{п}}$ — стрелка; $b_{\text{щ}}$ — длина хорды — приведенная ширина щупа.

Значением $\Delta_{\text{п}}^2$ из-за его малости можно пренебречь, тогда $b_{\text{щ}} = 8r_1\Delta_{\text{п}}$. При допустимой ошибке измерения $0.025Rz$ значение приведенной ширины щупа можно определять из выражения

$$b_{\text{щ}} = \sqrt{0,2Rzr_1}. \quad (2.5)$$

Значение N_h характеризует число ПН, высота которых больше величины h_3 . Если общее число ПН на единице площади поверхности (мм^2) равно $N_{\text{п}}$, то

$$\frac{N_h}{L^2} = N_{\text{п}} \int_{h_1}^{\infty} p(h_{\text{п}}) dh_{\text{п}}. \quad (2.6)$$

После подстановки в формулу (2.6) выражения $p(h_{\Pi})$ из формулы (2.3), с учетом соотношения (2.4) получим выражение для расчета N_{Π} :

$$N_{\Pi} = N_{\text{в}} \exp(\lambda_{\text{н}} h_3) / L[M(D) + b_{\text{ш}}]. \quad (2.7)$$

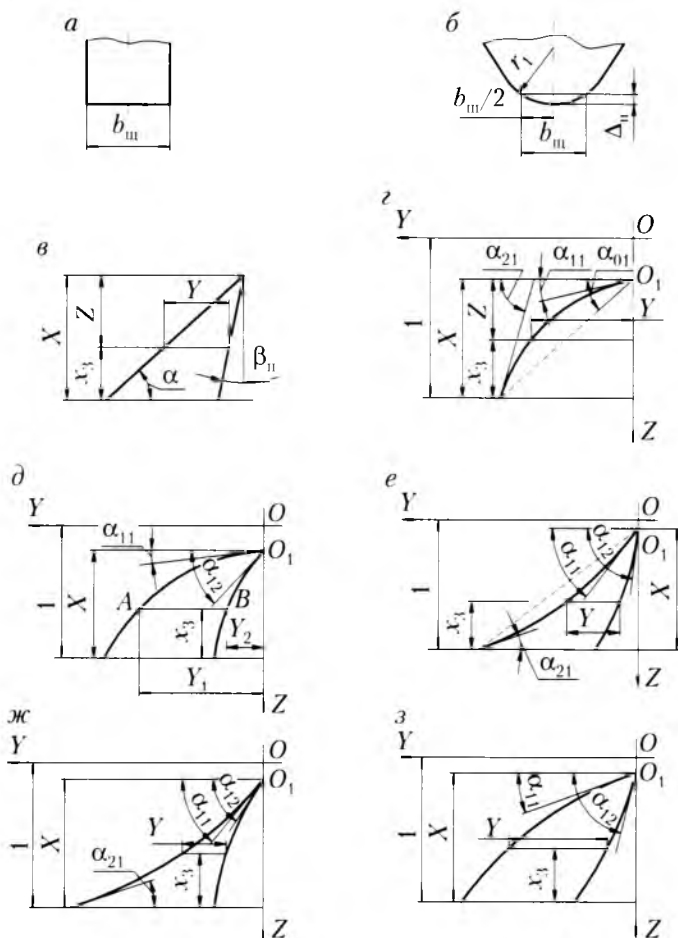


Рис. 2.29. Щуп в виде пластины (а), конуса (б), ПН в виде прямого наклонного конуса (в); образующая криволинейного наклонного конуса (г), ПН в виде наклонного конуса с выпукто-вогнутым профилем (д), наклонного конуса с вогнуто-выпуклым профилем (е), вогнутого конуса (ж), выпуклого наклонного конуса (з)

Плотность N_p расположения ПН на различных уровнях сечения можно определять по выражению

$$N_p = K_{\text{ПН}} N_{\text{П}}. \quad (2.8)$$

В формулах (2.6), (2.7): $N_{\text{в}}$ — число встреч щупа с ПН (определяется предложенным способом по показаниям устройства [6]; $\lambda_{\text{П}}$ — параметр закона распределения, $\lambda_{\text{П}} = (6,7 \pm 0,5)Rz$; h_3 — расстояние плоскости сечения-уровня порога до базы, $h_3 = h_{\text{П}} - p$ (здесь p — уровень сечения профиля по ГОСТ 2789–73); L — длина трассирования щупа, обычно 1 мм; $M(D)$ — математическое ожидание диаметров кругов в плоскости сечения, определяется по формуле $M(D) = 0,268Rz \exp(-6,7h_3/Rz) - 0,0022(1,149Rz - h_3)$; $b_{\text{П}}$ — приведенная ширина конического щупа (определяется по формуле (2.5); $K_{\text{ПН}}$ — коэффициент плотности расположения ПН, зависящей от уровня сечения профиля p : при p , равных $0,4Rz$; $0,3Rz$; $0,2Rz$; $0,1Rz$; 0 , значение $K_{\text{ПН}}$ равно соответственно 1,0; 0,7; 0,4; 0,2; 0,1.

Исследованием установлено, что величина N_p с достаточной для практики точностью определяет число выступов неровностей, превышающих уровень Rz на рабочих поверхностях деталей из труднообрабатываемых и других вязкопластичных материалов, обработанных резанием, и может служить исходной величиной для расчета значений A_r и $F_{\text{оп}}$ при различных уровнях p сечения профиля поверхности.

Единичную площадь сечения одной неровности поверхности (с сечением в виде круга) $F_{\text{сo}}$ можно определять по формуле

$$F_{\text{сo}} = \pi[M(D)]^2 = 0,785[M(D)]^2.$$

Тогда действительная площадь контакта A_{rv} (удельная), приходящаяся на 1 мм² площади поверхности, и относительная опорная площадь $F_{\text{оп}}$ на различных уровнях p сечения профиля выражаются зависимостью

$$A_{\text{rv}} = F_{\text{оп}} = F_{\text{сo}} N_p = 0,785 N_p [M(D)]^2.$$

Среднее превышение $h_{\text{П,ср}}$ поднутренных неровностей над уровнем Rz с учетом статистического распределения их значений определяется по формуле

$$h_{\text{П,ср}} = \int_0^{Rz} h_{\text{П}} p(h_{\text{П}}) d(h_{\text{П}}) = 0,148 Rz.$$

Однако расчет величин A_r и $F_{\text{он}}$ по выведенным зависимостям следует считать приближенным, так как по начальному условию поперечное сечение каждой ПН — круг диаметром D , а реальные ПН имеют сечения, приведенные к основным фигурам: эллипсу, треугольнику, трапеции (см. рис. 2.19). В результате дальнейшего математического и имитационного моделирования на ЭВМ выявлены зависимости, позволяющие значительно уменьшить ошибки при аналитических расчетах площадных характеристик микрогеометрии рабочих поверхностей прецизионных деталей и соединений.

Для имитационного моделирования и разработки графоаналитического метода расчета все профили ПН приведены к пяти разновидностям (см. табл. 2.4), схемы которых и данные для расчетов представлены на рис. 2.29, в–з.

Единичная площадь сечения одной неровности (см. табл. 2.4) в виде прямого наклонного конуса с сечением в виде:

□ круга —

$$F_{\text{с0}} = \pi [M(D)]^2;$$

□ эллипса (С-1) —

$$F_{\text{с1}} = K_1 \pi Y^2 / 4;$$

□ треугольника (С-2) —

$$F_{\text{с2}} = K_2 Y^2 / 2;$$

□ трапеции (С-3) —

$$F_{\text{с3}} = [(1/K_3) + (1/K_4)] Y^2 / 2,$$

где $K_1 = 0,4 \dots 0,5$; Y — характеристика сечения (размер); $K_2 = 0,5 \dots 0,65$; $K_3 = 1,75 \dots 2,08$; $K_4 = 2,18 \dots 4,35$.

В соответствии с табл. 2.4 средняя единичная площадь F_c ПН с различными сечениями

$$F_c = 0,23 F_{\text{с1}} + 0,48 F_{\text{с2}} + 0,29 F_{\text{с3}}.$$

Описанные выше расчеты выполняются на ЭВМ в соответствии с разработанным алгоритмом и универсальной программой со сменным блоком «Вычисление Y » для определения значений параметров микрогеометрии поверхности с ПН-1, ПН-2, ПН-3, ПН-4 и ПН-5 (см. табл. 2.4). Моделирование на ЭВМ позволило получить графическую картину изменения плотности вероятности размерной характеристики площадок контакта в зависимости

от уровня сближения поверхностей. Построены графики зависимости величины F_{ei} от x_3 (F_{ei} — единичная площадь сечения ПН различного профиля, $x_3 = h_3/Rz$). По известным значениям F_{e1} – F_{e5} , N_p и количественному соотношению ПН-1–ПН-5 (см. табл. 2.4) определена единичная площадь средневзвешенной неровности при заданном уровне сближения шероховатой поверхности с гладкой:

$$F_e = 0,45F_{e1} + 0,35F_{e2} + 0,20F_{e3} + 0,05F_{e4} + F_{e5}.$$

С помощью ЭВМ построены графические зависимости относительной единичной площади ПН $F_o = F_e/Rz$ от $x_3 = h_3/Rz$ для различных материалов и способов обработки.

Графики зависимостей $F_o = f(x_3)$ (на рис. 2.30 показан график для стали 12Х18Н10Т, обработанной отделочным точением) явились основой предложенного графоаналитического метода расчета фактической удельной A_{ry} и относительной опорной $F_{он}$ площадей по формуле

$$A_{ry} = F_{он} = F_o Rz^2 N_p, \quad (2.9)$$

где F_o — относительная площадь одной неровности, $F_o = F_e/Rz^2$, может определяться по графику (рис. 2.30, кривая F_o).

Полученное по формуле (2.9) значение является действительной площадью A_{ry} контакта единицы номинальной площади A_n контактирующей поверхности. Относительной опорной площадью $F_{он}$

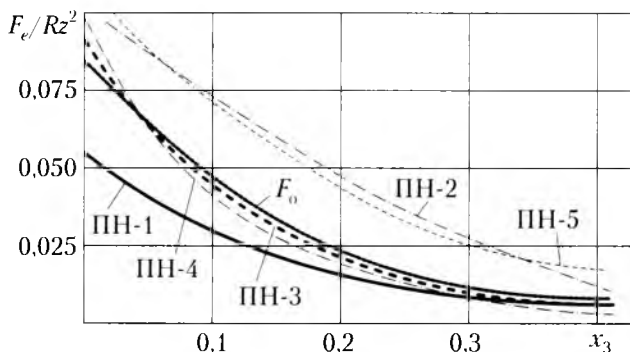


Рис. 2.30. График зависимостей F_e/Rz^2 от x_3 различных ПН (ПН-1–ПН-5) и относительной единичной площади F_o средневзвешенной ПН

можно считать значение $A_{г\gamma}$ в долях единицы площади, для которой определено значение N_p (обычно 1 мм^2).

Таким образом, разработанный алгоритм и программа позволили провести исследование величин Y , $p(y)$, F_c и других характеристик ПН, выявить графические зависимости значений F_c и F_e от h_z , позволяющие уточнить приведенные выше формулы и обеспечить уточненный расчет $A_{г\gamma}$ и $F_{оп}$ шероховатой поверхности на различных уровнях p сближения контактирующих поверхностей.

2.2.6. Классификация поверхностей и нормирование их микрогеометрии в стадии проектирования изделий

В результате разработки способа оценки микрогеометрии поверхностей с ПН, создания моделей и классификации ПН, математической модели поверхности, обладающей ими, имитационного моделирования ПН стала возможной классификация рабочих поверхностей прецизионных деталей и нормирование их по параметрам h_n и N_n . Параметры β_n , β_z , N_p , F_c , $A_{г\gamma}$, $F_{оп}$ описаны статистически, их количественные соотношения могут устанавливаться по классификации ПН (см. табл. 2.4), а значения рассчитываются по вышеприведенным формулам.

В основу классификации поверхностей положены следующие принципы:

- эксплуатационные свойства поверхностей деталей и соединений зависят прежде всего от наличия или отсутствия ПН, выхода или невыхода их по высоте за пределы уровня R_z , значения превышения h_n и плотности N_n расположения ПН на поверхности;

- при одном и том же значении R_z максимальное превышение величины h_n ПН определяет соотношение их количественного распределения по высоте на единице площади, эти соотношения сохраняются при различных способах обработки всех вязкопластичных материалов; снижение значения (исключение определенного уровня) автоматически приводит к уменьшению плотности N_n ;

- выбор разновидности поверхности связан с требованиями к эксплуатационным свойствам прецизионных деталей и соединений;

- простота технологического и метрологического обеспечения заданных разновидностей деталей и соединений.

В соответствии с изложенными принципами разработана классификация рабочих поверхностей прецизионных деталей и соединений и рекомендации по их выбору (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Классификация рабочих поверхностей прецизионных деталей

Разновидность	Наличие ПН	Превышение h_n , мкм	Плотность N_n , ПН/мм ²	Детали и соединения, на (в) которых целесообразно обеспечивать микрогеометрию рабочих поверхностей данной разновидности
1	Нет	—	—	Детали, отвечающие требованиям: контактной жесткости, коррозионной стойкости, ламинарности течения газа, жидкости и кумулятивности струи, адгезии и качества гальванических и химических металлопокрытий, малого уровня загрязненности; подвижные соединения с требованиями легкости сдвига и плавности перемещения деталей, противозадирности, пневмо- и гидротноности, размерной стабильности зазоров, износостойкости деталей из резины, эластомера, войлока и фетра уплотнительных устройств
2	Есть	0	До 80	Детали и подвижные соединения, отвечающие требованиям: нагнетания жидкости и газа в зазоры (гидро- и аэродинамические подшипники), контактной жесткости, износостойкости и противозадирности, надежного контактирования и малого переходного электросопротивления подвижных контактов
3	Есть	До 0,1Rz	До 160	Детали с поверхностями под покрытия лаками и красками; неразъемные соединения, обеспечиваемые пластическим деформированием одних деталей в другие (например, втулки в отверстие корпуса) и склеиванием
4	Есть	До 0,2Rz	До 220	Детали стыковых постоянно замкнутых неподвижных электроконтактов; неразъемные соединения и покрытия, обеспечиваемые напылением металлов в жидком состоянии

Окончание табл. 2.6

Разновидность	Наличие ПН	Превышение $h_{\text{п}}$, мкм	Плотность $N_{\text{п}}$, ПН/мм ²	Детали и соединения, на (в) которых целесообразно обеспечивать микрогеометрию рабочих поверхностей данной разновидности
5	Есть	До 0,3Rz	До 260	Детали подвижных электроконтактов (коллекторных устройств), работающих в условиях пара и газовой выделений, тормозных устройств; неразъемные соединения, обеспечиваемые заливкой одной детали материалом в жидком состоянии (например, подшипников из баббитов и эпоксидных компаундов, деталей из стекла) в другую
6	Есть	До 0,4Rz	До 280 и более	Детали тормозных устройств, стыковых постоянно замкнутых неподвижных электроконтактов высокого напряжения; неразъемные соединения, обеспечиваемые запрессовкой или напрессовкой деталей в нагретом или охлажденном состоянии и заливкой жидкого материала

Классификация позволяет при разработке новых изделий машино- и приборостроения назначать вместе с другими параметрами микрогеометрии разновидности поверхностей деталей и соединений в соответствии с изложенными в табл. 2.6 рекомендациями. Указание разновидности поверхности на чертеже детали является достаточным для технологов, чтобы обеспечить необходимые параметры микрогеометрии поверхности с ПН в указанных пределах при изготовлении деталей и сборке соединений.

2.2.7. Выбор способов обработки и задание параметров качества прецизионных деталей и соединений

Отделочная обработка прецизионных деталей из вязкопластичных материалов в соответствии с табл. 2.3 и 2.6 должна:

- обеспечивать точность поверхностей квалитетов 5–7 и уровни А, В и С относительной геометрической точности деталей;
- способствовать размерной стабильности поверхностей деталей и зазоров соединений;
- обеспечивать поверхности с $Ra_{\text{ср}} = 0,1 \dots 0,4$ мкм;

□ приводить к отсутствию или наличию ПН с превышением величины h_n от 0 до $0,4Rz$ и плотностью расположения от 0 до 280 ПН/мм² и более;

□ исключать загрязнение поверхностей деталей и зазоров соединений в процессе производства и эксплуатации изделий;

□ способствовать исключению дефектов (мелких раковин и пор) в подповерхностном слое материалов и покрытиях деталей;

□ приближать к оптимальному физико-химическое состояние подповерхностного слоя материала деталей;

□ осуществляться просто и экономически эффективно.

Классификация методов и способов

Метод обработки	Способы отделочной и отделочно-упрочняющей обработки	Наличие электролита, СОЖ	Обеспечение точности размеров и формы (качества 5, 6, 7; уровни А, В, С)	Обеспечение $Ra_{\text{нп}}$ от 0,4 до 0,1 мкм материала с HRC	
				≤ 50	> 50
Резание обычное	Точение	+	—	—	+
	Фрезерование	+	—	±	+
	Сверление	+	—	—	—
	Зенкерование	+	—	—	—
	Развертывание	+	—	±	—
	Шлифование	+	+	—	+
	Доводка и полирование	+	+	+	+
Резание вибрационное	Хонингование и суперфиниш-ирование	+	+	+	+
	Точение	+	—	—	—
	Фрезерование	+	—	—	—
	Сверление	+	±	±	—
	Шлифование	+	+	—	+
	Доводка и полирование	+	+	+	+

Метод обработки	Способы отделочной и отделочно-упрочняющей обработки	Наличие электролита, СОЖ	Обеспечение точности размеров и формы (качества 5, 6, 7; уровни А, В, С)	Обеспечение Ra_{cp} от 0,4 до 0,1 мкм материала с HRC	
				≤ 50	> 50
Резание с дополнительным воздействием	Электроабразивная обработка	+	±	±	+
	Магнитоабразивная обработка	+	—	±	+
	Резание с опережающим ППД	+	—	±	+
Электрофизическая, электрохимическая и ультразвуковая обработка	Электроэрозионная обработка	+	—	—	—
	Электрохимическое шлифование	+	—	±	±
	Ультразвуковая обработка	+	±	±	+
	Электрохимическое полирование	+	±	±	±
	Анодо-механическое шлифование	+	+	+	+
Обработка ППД	Накатывание	±	+	+	—
	Алмазное выглаживание	±	+	+	+
	Дорнование сульфидированными дорнами	±	+	+	—
Вибрационная обработка ППД	Вибрационное накатывание шарами	±	+	+	—
	Вибрационное накатывание профильными роликами	±	+	+	—
	Вибрационное алмазное выглаживание	±	+	+	+

Окончание табл. 2.7

Управление ПН материала с HRC		Низкий уровень загрязненности материала с HRC		Уменьшение дефектов материала с HRC		Обеспечение рациональных параметров материала с HRC за счет упрочнения		Простота обеспечения обработки	Экономичность осуществления	Предпочтительность использования
≤ 50	> 50	≤ 50	> 50	≤ 50	> 50	≤ 50	> 50			
+	+	—	—	—	—	—	—	—	+	—
+	+	—	—	—	—	—	—	—	+	—
—	—	—	+	—	—	—	—	+	+	+НЗМ
+	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
±	+	—	—	—	—	—	—	—	+	—
+	+	—	—	—	—	—	—	—	+	—
±	±	—	—	—	—	—	—	—	+	—
±	±	—	—	—	—	—	—	—	+	—
+	—	+	—	+	—	+	—	+	+	+НЗМ
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+НЗМ
+	—	+	—	+	—	+	—	+	+	+НЗМ
+	—	+	—	+	—	+	—	+	+	+НЗМ
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+НЗМ и ЗМ
+	—	+	—	+	—	+	—	+	+	+НЗМ
+	—	+	—	+	—	+	—	+	+	+НЗМ
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+НЗМ и ЗМ

Примечания: 1. Знак «+» подтверждает наличие материала и достижение параметра, знак «—» отрицает это достижение. 2. Знак «±» подтверждает частичное достижение параметра. 3. Условные обозначения: ПЧО — полущистовая обработка; ЗМ — закаленный материал с твердостью более 50 HRC; НЗМ — незакаленный материал с твердостью не более 50 HRC.

следует применять лишь для деталей с высокой твердостью материала.

Обычное точение и фрезерование, как хорошо геометрически управляемые процессы резания, можно рекомендовать для получистой обработки рабочих поверхностей прецизионных деталей из труднообрабатываемых материалов. Эти способы обработки, осуществляемые с достаточно большой глубиной резания, при точном и жестком оборудовании, оптимальных параметрах процесса и применении эффективных СОЖ [4, 8, 13, 21] обеспечивают поверхности прецизионных деталей необходимой точности и шероховатости с $Ra_{cp} = 1,6...0,8$ мкм, практическим отсутствием ПН.

Вибросверление желательно использовать для обработки отверстий малого диаметра и большой длины с обеспечением точности качества 7 и шероховатости с $Ra_{cp} \geq 0,4$ мкм. Если требуется шероховатость поверхности с $Ra_{cp} < 0,4$, можно применять дорнование сульфидированными дорнами, которое может повышать точность отверстий и снижать Ra_{cp} с исходного значения 0,4 мкм до 0,1 мкм.

Для отделочной обработки цилиндрических и фасонных поверхностей прецизионных деталей из вязкопластичных материалов при осуществлении специальной настройки можно использовать накачивание и вибронакатывание шарами и профильными роликами. Вибронакатывание роликами осуществляется за счет профильного контура роликов и не требует источников вибрации, что исключает отрицательное воздействие вибрации на прецизионное оборудование и шумовое — на человека. В качестве отделочной обработки поверхностей прецизионных деталей из материалов с высокой твердостью следует рекомендовать выглаживание и вибровыглаживание алмазными наконечниками.

В результате обобщения литературных данных, выполненных исследований и опыта предприятий по повышению технического уровня и качества выпускаемых изделий для каждого случая установлена система параметров качества рабочих поверхностей и подповерхностного слоя материала, обеспечивающая требуемые эксплуатационные свойства прежде всего прецизионных деталей и соединений. Рекомендованы также способы обеспечения качества поверхности и состояния подповерхностного слоя материала деталей (табл. 2.8 на с. 372–375).

2.3. Регуляризация микрогеометрии поверхностей, упрочнение материалов и их обеспечение



2.3.1. Сущность, особенности и достоинства регуляризации микрогеометрии поверхностей

Из всех решений, принимаемых конструктором при проектировании деталей машин, приборов и аппаратов, в большинстве случаев наименее научно обоснованными и надежными являются решения по нормированию и предъявлению требований к качеству рабочих поверхностей деталей, и в первую очередь, к их микрогеометрии. Это обусловлено негативными органическими свойствами практически всех традиционно применяемых методов отделочной обработки способами резания, в основе которых лежит неоднородное пластическое деформирование обрабатываемого материала, приводящее к образованию хаотичного по расположению и форме неровностей микрорельефа, обоснованно называемого шероховатостью поверхности.

Фактически при обработке резанием не достигается создание рациональной микрогеометрии, обеспечивающей требуемые эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей, самих деталей, соединений, машин и приборов в целом, а приходится «мириться» с той хаотичной, практически неуправляемой микрогеометрией, которая образуется на поверхности в результате отделочной замыкающей технологический процесс операции.

Возникает задача рационализации микрорельефа рабочих поверхностей деталей. Одно направление, которым идут в большинстве случаев как в государствах СНГ, так и в других промышленно развитых странах, — экспериментальные исследования и на основе анализа их результатов рационализация геометрических параметров микрорельефа рабочих поверхностей деталей для тех или иных конкретных условий их эксплуатации.

Есть другое кардинальное направление решения проблемы — переход от шероховатых поверхностей к поверхностям с упорядоченным, т.е. регулярным микрорельефом [4–7, 9, 15, 20]. Направление регуляризации разрабатывается сравнительно недавно: все

Рекомендуемые комплексы параметров качества

Тип деталей (материалы и требования к качеству по чертежам)	Параметры микрогеометрии, вид поверхности и необходимость образования РМР
Детали типа корпусов, крышек, колец (ВТ1-1, $Ra_{cp} = 0,2...0,4$ мкм) и сердечников (ВТ5, $Ra_{cp} = 0,2$ мкм) микроэлектромашин автоматики	$Ra_{cp} = 0,2...0,4$ мкм; $t_p = 3...15$ %; $F_{он} = 0,7...0,9$ %; $r = 0,8$ мм; $r/R_{max} = 400...410$; $\alpha = 5...14^\circ$; $\gamma = 21...45^\circ$; $h = 0,002...0,003$ мм; $F_{н} = 55...70$ %; РВ 0; ПРМР + ЧРМР
Детали типа пакетов статора и ротора микроэлектростанции автоматики (79НМ, $Ra_{cp} = 0,2...0,4$ мкм; 50Н, $Ra_{cp} = 0,4$ мкм)	$Ra_{cp} = 0,2...0,4$ мкм; $r = 0,45...0,5$ мм; $\alpha = 6...10^\circ$; РВ 0 (отсутствие ПН и замыкания пластин); ПРМР
Детали типа коллектора (пластины — М1 с родиевым покрытием толщиной 4...5 мкм) и щетки (БрБ2) электромашин ($Ra_{cp} = 0,2; 0,4$ мкм)	Коллекторы: $Ra_{cp} = 0,2$ мкм; $r = 0,5...0,8$ мм; $r/R_{max} = 350...380$; $F_{он} = 2,4...3,8$ %; РВ 0; ПРМР с обеспечением $R_{max} \geq Rz$. Щетки: $Ra_{cp} = 0,4$ мкм; $r = 0,08...0,12$ мм; $F_{он} = 0,2...0,32$ %; ($h_{н} = 0$; $N_{н} \leq 80$ ПН/мм ²) и РВ 4 ($h_{н} = 0,4...0,6$ мкм, $N_{н} = 220...260$ ПН/мм ²) при работе в условиях повышенной влажности
Детали типа муфт, валов, гильз, штоков, поршней, цилиндров, валов-шестерен, штуцеров редукторов, пневмо- и гидроприводов металлообрабатывающего оборудования, коробок перемены передач и тормозных систем автомобилей (стали 12Х18Н10Т, 4018Н2М, 20 и А12 с цинкованием, 40Х, 50Х, $Ra_{cp} = 0,2...0,6$ мкм)	$Ra_{cp} = 0,2...0,6$ мкм; $r = 0,8...1,2$; $r/R_{max} = 800...850$; $F_{он} = 2,2...4,2$ %; $\alpha = 10...12^\circ$; $\gamma = 31...35^\circ$; $Sm = 0,03...0,07$ мм; РВ 0; ПРМР
Детали типа цилиндров (ЛС59-1) и поршней (Л63) демпферов с химическим никелевым покрытием ($Ra_{cp} = 0,2...0,3$ мкм)	$Ra_{cp} = 0,2...0,3$ мкм; $r = 0,6...1,2$ мм; $r/R_{max} = 600...650$; $F_{он} = 1,6...2,0$ %; $Sm = 0,06...0,08$ мм; $\alpha = 8...10^\circ$; РВ 0; ПРМР с обеспечением $R_{max} \geq Rz$
Детали типа плунжеров топливных насосов двигателей и калибров (стали ХВГ, У10, Х с хромовым покрытием, твердый сплав ВК6М, $Ra_{cp} = 0,03...0,1$ мкм)	$Ra_{cp} = 0,1$ мкм; $r = 0,9...2,0$ мм; $r/R_{max} = 500...810$; $F_{он} = 1,8...2,4$ %; $\alpha = 12...14^\circ$; $\gamma = 31...35^\circ$; $h = 3...4$ мкм; $F_{н} = 58...68$ %; РВ 0; ПРМР + ЧРМР

Таблица 2.8

деталей и способы их обеспечения

Показатели состояния подповерхностного слоя материала	Способы обработки	
	традиционные	рекомендуемые
220 HV; 280 H_{μ} (BT1-1); 350 HV (BT5); $h_{\sigma} = 0.02$ мм; $C_v = 70$ %; вакуумное оксидирование (толщина слоя 0.017...0.019 мм), электролитическое сульфидирование (толщина слоя 0.011...0.013 мм)	Точение, фрезерование	Накатывание и вибронакатывание шарами и роликами
40...42 H_{μ} ; $h_{\sigma} \leq 0.02$ мм; $C_v \leq 24$ %	Шлифование без СОЖ	Накатывание шаром после точения
$h_{\sigma} = 0.003...0.012$ мм, $C_v \leq 22$ %, отсутствие загрязнения поверхности	Шлифование, точение, полирование	Накатывание и вибронакатывание шаром и алмазное выглаживание (после покрытия)
Для сталей с термической и химико-термической обработкой: 55...63 HRC, после ППД $C_v = 5.5$ %. Для сталей в незакаленном состоянии (12X18H10T): 457...470 H_{μ} ; $h_{\sigma} = 0.027...0.029$ мм; $C_v = 69...74$ %	Шлифование, точение, зачистка шкуркой	Получистовое шлифование и точение, накатывание, вибронакатывание, алмазное выглаживание
600 H_{μ} ; $C_v = 12$ %; исключение пор и загрязнения слоя покрытия	Доводка до и после химического никелирования	Алмазное выглаживание и дорнование до покрытия и алмазное выглаживание после покрытия
61...64 HRC (стали) и 86...89 HRA (твердый сплав); для сталей $C_v = 14$ и 25 % (наплывы металла у канавок — РПН)	Шлифование и доводка пастами	Алмазное выглаживание и вибровыглаживание

Тип деталей (материалы и требования к качеству по чертежам)	Параметры микрогеометрии, вид поверхности и необходимость образования РМР
Детали типа корпусов датчи- ковых систем ВТ6, ВТ3-1. $Ra_{cp} = 0,8$ мкм)	$Ra_{cp} = 0,8$ мкм; $\beta_{II} = 0...12^\circ$; $\beta_s = 48...58^\circ$; $F_{оп} = 0,1...1,2$ %; РВ 4 ($h_{II} = 0,8...1,2$ мкм; $N_{II} = 220...260$ ПН/мм ²).
Детали типа сферических ро- торов (ШХ15, $Ra_{cp} = 0,1$ мкм) и подшипников-чаш (БрО8С12, $Ra_{cp} = 0,2$ мкм) аэродинамических подвесов	Ротор: $Ra_{cp} = 0,1$ мкм; $r = 0,07...0,12$ мм; $\beta_{II} = 0...14^\circ$; $\beta_s = 45...60^\circ$; РВ 1 ($h_{II} = 0...0,05$ мкм; $N_{II} = 80$ ПН/мм ²). Подшипник-чаша: $Ra_{cp} = 0,2...0,3$ мкм; $\sigma_p = 0,3$ мкм; $r = 4,5...5$ мм; $r/R_{max} = 2500...3000$; $\alpha = 3...3,5^\circ$; $\gamma = 15^\circ$; $F_{оп} = 4...4,2$ %; постоян- ство количества впадин круговых сечений; РВ 0 с обеспечением $R_{max} \geq Rz$; ПРМР
Детали типа трубок устройств кумулятивного действия (М1, ХН67ВМТЮ, ВТ3-1. $Ra_{cp} = 0,4$ мкм)	$Ra_{cp} = 0,4$ мкм; $\sigma_p = 0,39...0,4$ мкм; $r = 3,7...4,8$ мм; $r/R_{max} = 1050...1400$; $\alpha = 3...4^\circ$; γ до 45° (вибросверление) и $\gamma = 90^\circ$ (дорнование), РВ 0 с обеспечением $r/R_{max} \geq Rz$
Детали типа фасонных корпу- сов глубоководной аппарату- ры (АК7, АК9; $Ra_{cp} = 0,4$ мкм)	$Ra_{cp} = 0,4$ мкм; $r = 0,2...0,4$ мм; $r/R_{max} = 200...250$; $\gamma = 33...45^\circ$; $h = 2...2,5$ мкм; $F_{II} = 48...52$ %; РВ 2 ($h_{II} = 0,8$ мкм; $N_{II} = 80...160$ ПН/мм ²); ПРМР + ЧРМР
Детали изделий типа акусти- ческих устройств и хрономе- тров (Л63, ЛС59-1, с химиче- ским никелевым покрытием, $Ra_{cp} \geq 0,1$ мкм)	$Ra_{cp} = 0,1...0,3$ мкм; $r = 0,8...1,4$ мм; $r/R_{max} = 600...720$; $F_{оп} = 1,6...2,4$ %; $\alpha = 6...8^\circ$; $\gamma = 38...45^\circ$; РВ 2 ($h_{II} = 0,4$ мкм; $N_{II} = 80...160$ ПН/мм ²); ПРМР + покрытие

Примечание. Ra_{cp} — среднее значение среднего арифметического отклонения профиля; Rz — высота неровностей по 10 точкам; r — радиус скругления выступов неровностей; R_{max} — наибольшая высота неровностей; Sm — средний шаг неровностей по средней линии профиля; $F_{оп}$ — относительная опорная площадь поверхности; α — угол наклона образующих неровностей; γ — угол направления следов обработки; σ_p — среднее квадратическое отклонение неровностей

Окончание табл. 2.8

Показатели состояния подповерхностного слоя материала	Способы обработки	
	традиционные	рекомендуемые
340...350 H_μ ; $h_\sigma = 0,080...0,085$ мм; $C_\gamma = 24...25$ %; запас прочности поднутренных неровностей на срез не менее 2	Многократное растачивание	Вибросверление
Ротор: 60...65 HRC, исключение разрушения поднутренных неровностей при взаимодействии с газом. Чаша: 270...275 H_μ ; $h_\sigma = 0,025...0,028$ мм; $C_\gamma = 50...56$ %.	Обтачивание (ротор) и растачивание (чаша) с полированием пастами	Воздействие сухим притиром (без паст), накатывание и вибронакатывание шаром, алмазное вибровыглаживание
M1: 100 H_μ ; $h_\sigma = 0,06$ мм; $C_\gamma = 32$ %; ХН67ВМТЮ: 400 H_μ (вибросверление); 425 H_μ (дорнование); $h_\sigma = 0,10...0,012$ мм; $C_\gamma = 17,5...26$ %; ВТЗ-1: 350 H_μ (вибросверление), 380 H_μ (дорнование); $h_\sigma = 0,08...0,11$ мм; степень $C_\gamma = 25...35$ %	Растачивание	Вибросверление, дорнование сульфидированными дорнами
99...100 H_μ ; $h_\sigma = 0,223...0,282$ мм; $C_\gamma = 62,3...64$ %; отсутствие пористости, мелкой раковичности и загрязнения продуктами обработки	Обтачивание, шлифование шкуркой	Вибронакатывание профильными роликами
600 H_μ ; $C_\gamma = 12$ %; исключение пор слоя покрытия	Точение, фрезерование, опиливание, полирование пастой до и после покрытия	Пластическое формообразование, обкатывание и алмазное выглаживание

по высоте; F_{II} — относительная площадь, занятая регулярными неровностями (ЧРМР, покрытие); h — глубина (высота) регулярной неровности; h_{II} — среднее превышение ПН над уровнем Rz; N_{II} — плотность расположения ПН; β_{II} — угол поднутрения ПН; β_1 — угол заострения ПН; tr — относительная опорная длина профиля; РВ — разновидность поверхности (см. табл. 2.6); C_γ — степень упрочнения подповерхностного слоя; h_σ — глубина упрочненного слоя.

упиралось в трудности создания достаточно совершенного, универсального и в то же время простого способа образования регулярных микрорельефов на поверхностях деталей различных форм и размеров. За рубежом, например в США, предложены, разработаны и запатентованы способы, основанные на протравливании регулярно расположенных впадин микрорельефа через трафареты; в Англии, Франции и ФРГ созданы копировальные станки различной конструкции, с помощью которых регулярный микрорельеф создается по копирам. Все эти способы оказались неуниверсальными, сложными и трудоемкими при использовании, что и предопределило их весьма ограниченное применение в промышленности. Поэтому настоятельной стала задача создания способов регуляризации микрогеометрии поверхностей деталей, уменьшающих применение отделочного резания, химической и другой обработки со снятием слоя материала.

Предложенный Ю.Г. Шнейдером способ образования регулярных микрорельефов с помощью вибрационной обработки ППД — вибронакатывания [20] оказался лишенным ряда перечисленных выше недостатков. Реализация способа достигается с помощью шаров и виброголовок, обеспечивающих различные осциллирующие движения (вибрацию) инструмента относительно подвижной заготовки (рис. 2.31, *а–г*, поз. I).

В качестве деформирующего элемента вместо шара могут использоваться стандартные алмазные наконечники со сферической рабочей поверхностью, и тогда по тем же схемам и с использованием тех же виброголовок осуществляется вибрационное алмазное выглаживание поверхностей (рис. 2.31, *а–г*, поз. II). При этом можно обрабатывать поверхности деталей из закаленных сталей и других твердых материалов.

В соответствии с кинематикой относительного перемещения заготовки диаметром D_z и шара диаметром $d_{ш}$ или алмазного наконечника с радиусом сферы r_c , обеспечиваемой заданием частоты вращения n_z заготовки, подачи S , силы поджима P инструмента к поверхности, частот $n_{||}$ вращения и вибрации $n_{дв.х}$ инструмента, амплитуды $2A$ его колебаний, на обрабатываемую поверхность наносятся различные по глубине и ширине следы в виде синусоид или других кривых, взаиморасположение которых обеспечивает создание ЧРМР или ПРМР [4–7, 9, 15, 20].

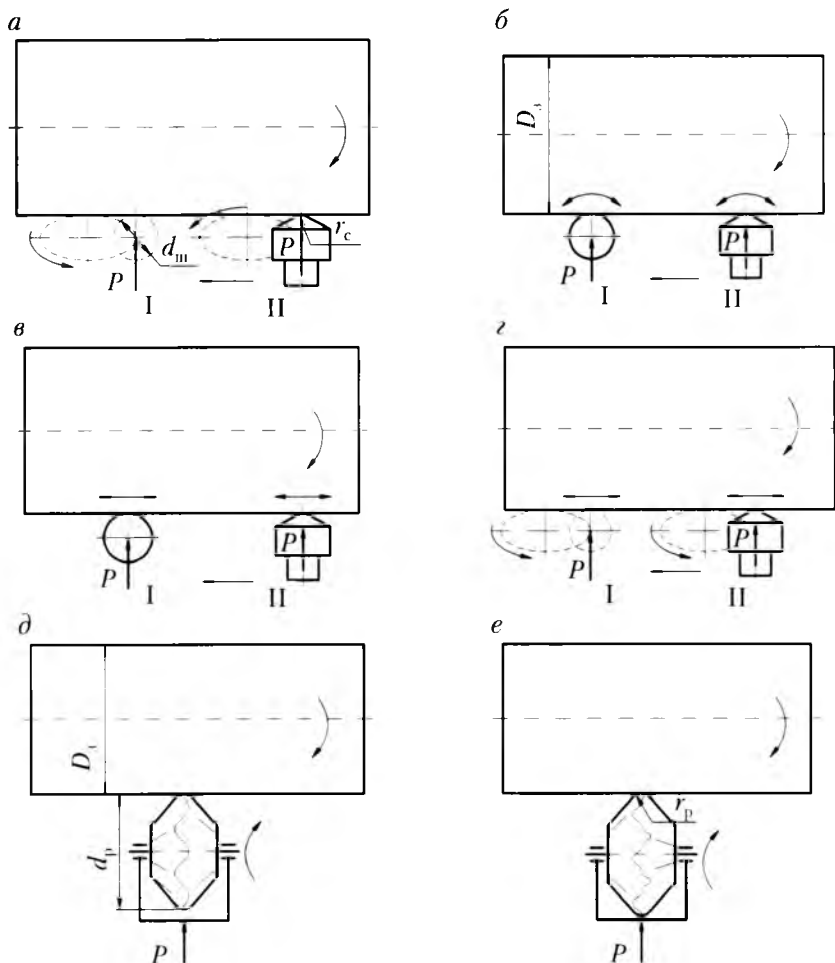


Рис. 2.31. Способы вибронакатывания при наличии источников вибрации (виброголовок):

а — с вращающимся вокруг смещенной оси инструментом; *б* — с осциллирующим по дуге инструментом; *в* — с осциллирующим вдоль оси заготовки инструментом; *г* — с вращающимся вокруг смещенной оси и осциллирующим вдоль оси заготовки инструментом; без источников вибрации; *д, е* — со свободно вращающимися профильными соответственно синусоидальными и косинусоидальными роликами (поз. I — с применением шара, поз. II — с применением алмазного наконечника)

Вибронакатывание без источников вибрации (рис. 2.31, *д, е*) с помощью предложенных автором профильных синусоидальных и косинусоидальных роликов [4–7] с попеременно чередующимися параметрами, наносящих следы обработки с чередующимися значениями двух параметров из трех (λ , $2A$ и γ), обеспечивает создание регулярных микрорельефов двухуровневого характера (ДУРМР). Использование способа вибронакатывания профильными роликами устраняет необходимость применения виброголовок, так как перемещение пятна контакта выпуклости ролика, образованной сочетанием цилиндрических поверхностей диаметром d_p и радиусом r_p , по обрабатываемой поверхности обеспечивается формой рабочего профиля (радиальными гофрами) инструмента, исключает отрицательное влияние вибрации на оборудование и шума на человека, повышает возможности регуляризации микрогеометрии фасонных поверхностей, декоративной обработки ППД и снижает затраты на обработку и оснастку. Примеры образования РМР на токарном станке мод. 1К62 с помощью приспособления с профильным синусоидальным роликом электромагнитной виброголовки показаны на рис. 2.32.

Существуют другие способы образования РМР. Так, Ю.И. Мулиным и коллегами предложен способ создания на наружных цилиндрических поверхностях деталей ПРМР с помощью ротационной многошаровой головки, которая позволяет повысить производительность процесса вибронакатывания (рис. 2.33). Разработан способ образования ЧРМР на поверхности прокатываемых на прокатных станах листов из различных материалов. При этом в качестве инструмента используются валки с рабочей поверхностью, обладающей ЧРМР. Л.Г. Одинцовым предложен способ образования микрорельефа на сферических поверхностях за счет кинематики относительного перемещения инструмента 1 (алмазного наконечника) и заготовки 2, вращающихся с частотами соответственно n_1 и n_2 относительно осей, расположенных под углом α (рис. 2.34) [7, 15, 20].

В настоящее время вибронакатыванием можно обрабатывать практически все без исключения поверхности заготовок деталей, включая прерывистые. На рис. 2.35 показаны схемы вибронакатывания различных поверхностей с образованием одноуровневых регулярных микрорельефов (ОУРМР) и двухуровневых регулярных

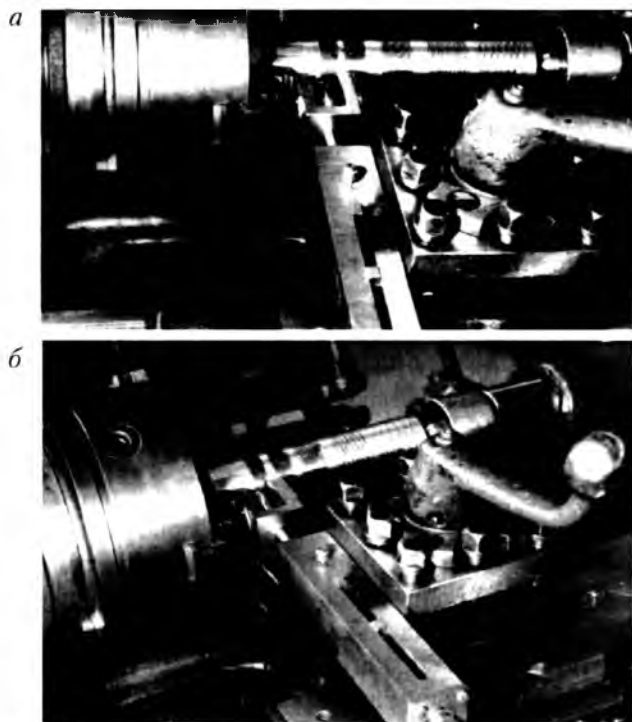


Рис. 2.32. Вибровыглаживание алмазным наконечником с помощью электромагнитной виброголовки (*а*) и вибронакатывание синусоидальным профильным роликом с помощью перенастраиваемого приспособления со сменными вилками на токарно-винторезных станках (*б*)



Рис. 2.33. Вибронакатывание цилиндрической поверхности штоков на токарно-винторезном станке с помощью ротационной многошаровой головки

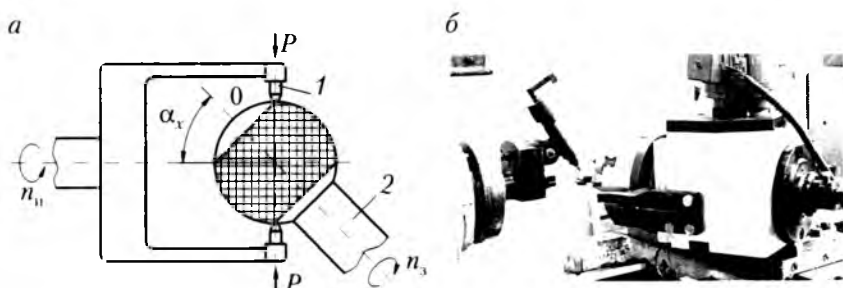


Рис. 2.34. Схема способа образования РМР на сферической поверхности грибка двигателя внутреннего сгорания (а) и алмазное вибровыглаживание грибка на токарно-винторезном станке мод. 1Е61 с помощью специального приспособления (б)

микрорельефов (ДУРМР). ОУРМР создаются при накатывании поверхностей шарами с помощью виброголовок и профильными синусоидальными роликами с постоянными параметрами. ДУРМР обеспечивается профильными синусоидальными с переменными параметрами и косинусоидальными роликами. На рис. 2.36 показаны развертки следов обработки, наносимых профильными роликами на цилиндрическую поверхность заготовок диаметром D_3 с подачей S на оборот заготовки. Прямыми синусоидальными роликами наносятся следы с постоянными значениями λ и $2A$ (рис. 2.36, а), с переменными значениями λ и $2A$ и постоянными значениями γ (рис. 2.36, б), с переменными значениями λ и γ и постоянным значением $2A$ (рис. 2.36, в), с переменными значениями $2A$ и γ и постоянным значением λ (рис. 2.36, г).

Применение наклонных профильных роликов обеспечивает нанесение синусоидальных или косинусоидальных следов, наложенных на синусоиду с длиной волны λ_1 и амплитудой 2δ (рис. 2.36, д).

Косинусоидальные прямые ролики наносят след (рис. 2.36, е), состоящий из прямых участков, расположенных под углом γ_1 к линии разветки, и участков в виде косинусоид, размещенных попеременно по обе стороны линии развертки цилиндрической поверхности заготовок под углом γ_2 .

Особенности и достоинства вибронакатывания и вибровыглаживания состоят в том, что варьирование параметров регулярных микрорельефов происходит не за счет использования сменных

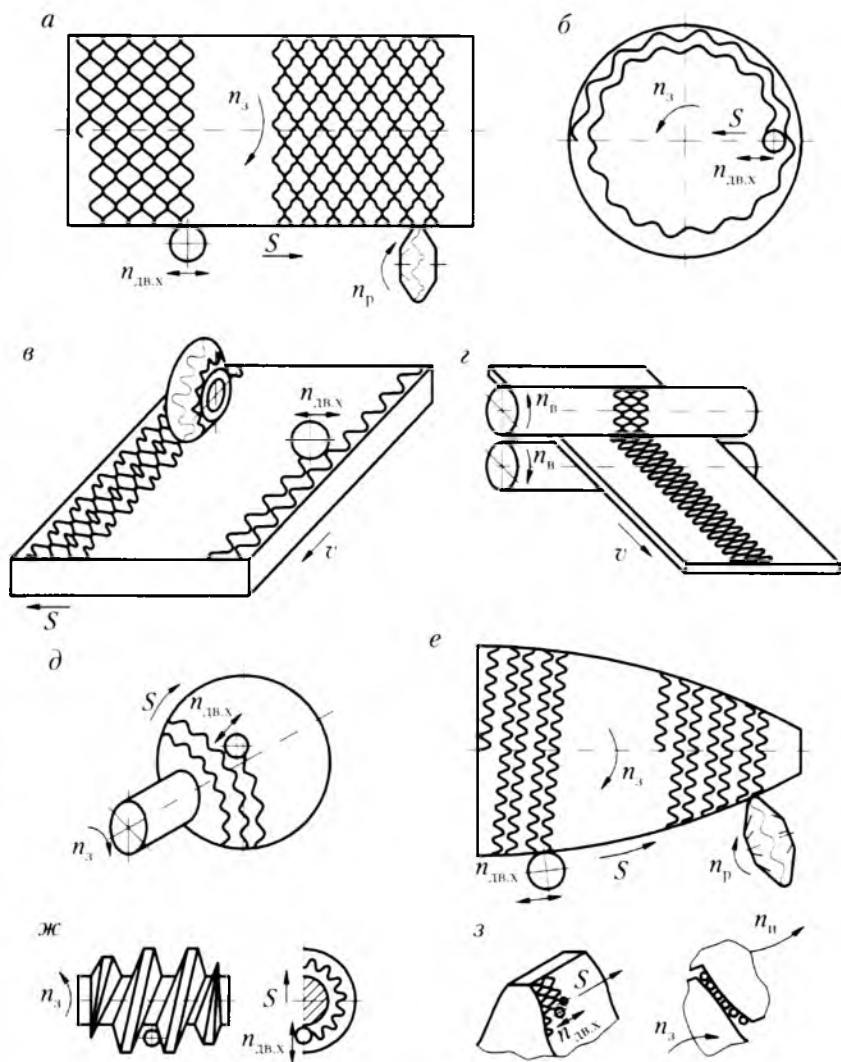


Рис. 2.35. Схемы вибронакатывания поверхностей различной формы: *а* – цилиндрической; *б* – торцевой; *в, г* – плоских; *д* – сферической; *е* – фанонной; *ж* – винтовой; *з* – эвольвентной (n_z – частота вращения заготовки; $n_{дв.х}$ – частота двойных ходов инструмента; S – подача; v – скорость обработки; P – сила поджима инструмента; n_n – частота вращения многошарового инструмента; n_p – частота вращения профилейных роликов; n_n – частота вращения прокатных валков)

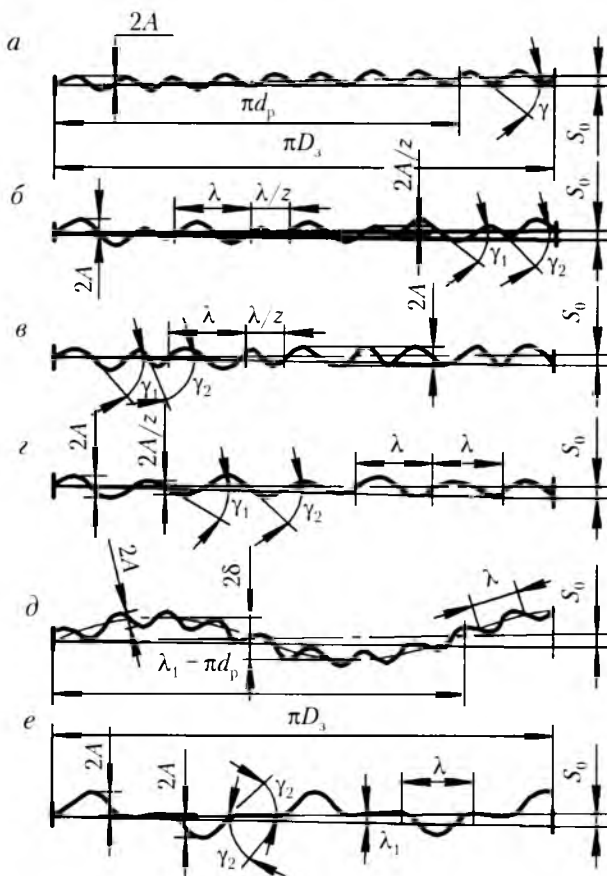


Рис. 2.36. Развертки следов, наносимых при вибронакатывании профильными синусоидальными (а, б, в, г), наклонным синусоидальным (д) и косинусоидальным (е) роликами

трафаретов или копиров, а путем изменения соотношений скоростей движения заготовки и деформирующего элемента или перестановки профильных роликов (смены вилок в приспособлениях).

При вибронакатывании (вибровыглаживании) в режиме образования ЧРМР на поверхностях деталей создаются регулярные по высоте, форме и расположению ПН в виде приканавочных наплывов материала. Рабочие поверхности с такими неровностями являются необходимым требованием для успешной работы неразъемных

соединений, обеспечиваемых напылением металла и заливкой его в жидком состоянии, напрессовкой одной детали на другую в нагретом или разжатом виде, деталей неподвижных постоянно замкнутых и подвижных электроконтактов, работающих в условиях паро- и газовыделений, тормозных устройств, функционирующих в условиях трения покоя, других пар.

В последние годы расширен круг применяемых для регуляризации микрогеометрии поверхностей деталей способов обработки ПЦЦ. Среди них виброударное обкатывание (когда на поверхности, например винтов, ударами шаров образуется ЧРМР вида 1 по ГОСТ 24773–81), управляемая обработка проволочными щетками специальной конструкции, отделочно-упрочняющая обработка ротационным минералокерамическим выглаживателем, ультразвуковая формообразующая и отделочно-упрочняющая обработка ППД, комбинированная и совмещенная обработка способами различного сочетания. К особенностям регулярных микрорельефов относятся:

- регулярность формы, размеров и расположения неровностей поверхности, что предопределяет возможность аналитически их рассчитывать в зависимости от требований к расчетному нормированию параметров микрорельефа рабочих поверхностей деталей;

- возможность независимого управления образованием микрорельефа с заданными высотой, шагом и расположением неровностей поверхности, включая РПН;

- возможность образования микрорельефов поверхностей с одинаковыми продольными и поперечными параметрами;

- возможность расчетного технологического обеспечения ЧРМР, ПРМР и РПН на основе функциональной связи их параметров с параметрами режима процессов вибронакатывания шарами и профильными роликами, вибровыглаживания алмазными наконечниками, виброударного воздействия шаров;

- возможность образования полностью регулярных микрорельефов, отличающихся от шероховатых поверхностей неровностями пологой формы с большими радиусами скругления выступов и впадин и малыми углами наклона образующих неровностей, на порядок и более отличающимися от значений этих параметров, характерных для микрорельефов, создаваемых отделочной обработкой способами резания (тонкое шлифование, доводка, хонингование, суперфиниш); поверхности с ПРМР относятся к разно-

видности РВ 0, на них полностью исключаются ПН, что является необходимым условием успешной работы пар в условиях трения скольжения, обеспечения плавности хода, обтекаемости и ламинарности перемещения газа в малых зазорах, кумулятивности струи и других важнейших эксплуатационных свойств;

□ возможность создания ЧРМР с наличием поднутренных неровностей (РПН) — приканавочных наплывов разновидностей 1–5 с определенными значениями превышения h_n плотности их расположения N_n и N_p ;

□ возможность нормирования конструктором и обеспечения технологом таких параметров микрорельефов поверхностей, как включенные в ГОСТ 24773-81 параметры N и T_p , и многие пока нестандартизованные параметры микрогеометрии, что практически позволяет перейти от нормирования и технологического обеспечения значений параметров микрорельефа «в сечении» к значениям «по площади»;

□ сочетание возможностей регуляризации микрогеометрии поверхностей со значительным упрочнением подповерхностного слоя материалов деталей.

Можно сделать вывод, что предложенные способы регуляризации микрогеометрии поверхностей вибрационной и безвибрационной обработкой ПЦЦ являются наиболее простым и дешевым путем решения проблемы улучшения качества и надежности деталей, соединений и изделий машино- и приборостроения.

2.3.2. Классификация, нормирование и стандартизация РМР

Классификация одноуровневых регулярных микрорельефов (ОУРМР) представлена на рис. 2.37 [5, 7, 15, 20]. Регулярные микрорельефы (РМР) делятся на 2 класса — частично регулируемые (ЧРМР) и полностью регулируемые (ПРМР). Все ЧРМР разделены на 5 видов, РМР — на 2 типа. РМР могут быть с элементами выпуклой (выступы) и вогнутой (впадины) формы. Наибольшее распространение получили ЧРМР с элементами вогнутой формы в виде дискретных регулярных впадин или непрерывных канавок, наносимых инструментами в виде шаров, алмазных наконечников и профильных роликов. Различаются ЧРМР с регулярными под-

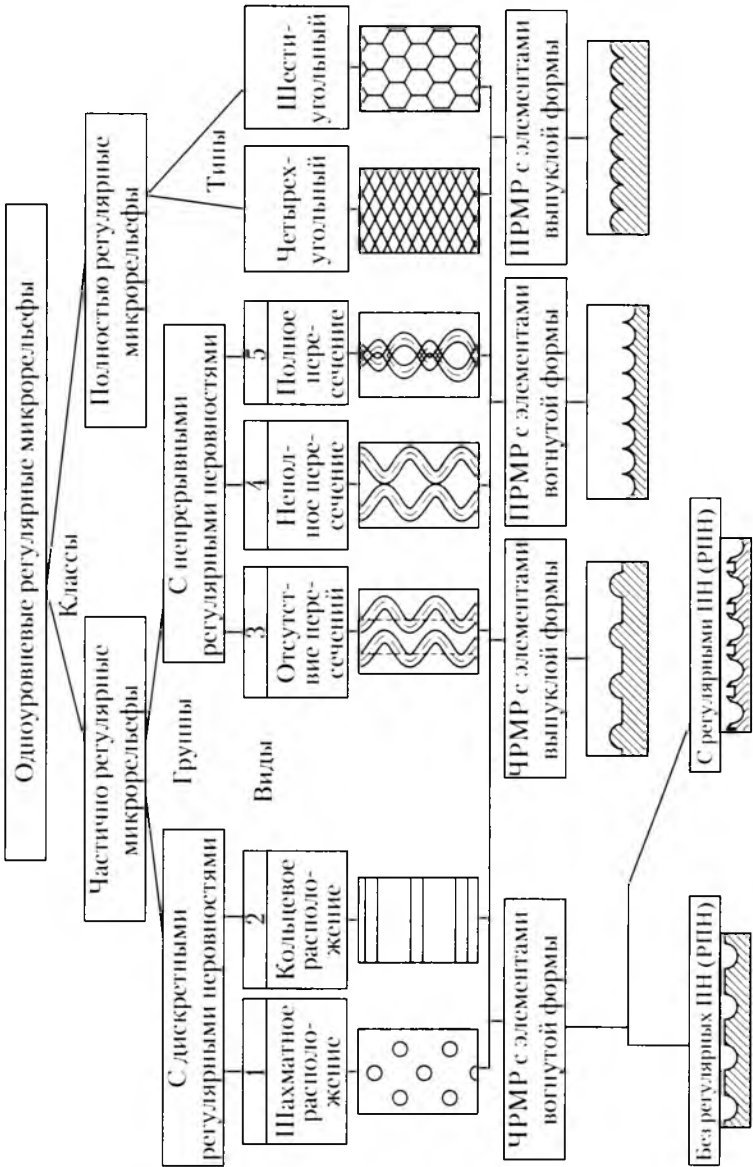


Рис. 2.37. Классификация ОУРМР

нутренними неровностями (РПН) в виде приканавочных наплывов материала, выдавленного из-под деформирующих элементов, и без них. Особенностью РПН является наличие у них угла поднутрения β_n (рис. 2.38, а). В случае отсутствия необходимости в РПН эти неровности удаляются способами резания (шлифова-

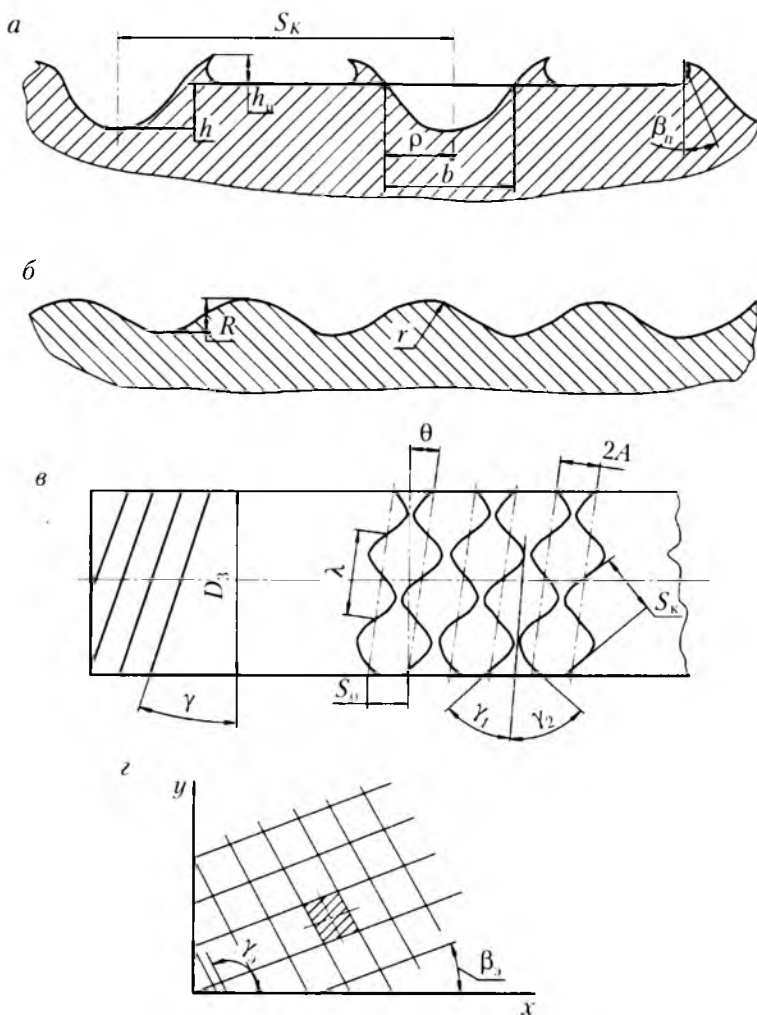


Рис. 2.38. Профили поверхностей с РМР (а, б) и виды на них сверху (в, з)

ние, точение, протягивание), комбинированной обработкой ППД (вибронакатыванием с последующим накатыванием шаром, вибровыглаживанием с последующим выглаживанием алмазным наконечником). Типовое сечение поверхности с ПРМР показано на рис. 2.38, б, где R — высота регулярной неровности (элемента), r — радиус ее скругления.

Поверхности с ЧРМР (рис. 2.38, а, в, г) оцениваются параметрами: глубиной (высотой) регулярной неровности h , относительной площадью F_n , углом сетки γ , углом направления неровностей θ , осевым и круговым шагами неровностей S_o и S_k , амплитудой непрерывной регулярной неровности $2A$, превышением h_n РПН, плотностью их расположения на единице площади N_n и в сечении N_p на уровне p .

Поверхности с ПРМР (см. рис. 2.38, б) характеризуются параметрами: высотой элемента R , числом элементов на единице площади N , относительной площадью T_p , углами направления расположения элементов и β_a и γ_s .

Все перечисленные выше характеристики присущи двухуровневым РМР, которые могут иметь параметры $2A$, λ , β_s , γ и γ_s двух уровней (см. рис. 2.36, 2.38, г). Классификация двухуровневых регулярных микро рельефов (ДУРМР) представлена на рис. 2.39. Наклонные профильные ролики, наносящие на поверхность следы в виде синусоид или косинусоид с наложением их на синусоиду с амплитудой $2A_1 = 2\delta$ и длиной $\lambda_1 = \pi d_p$ (см. рис. 2.36, д), являются основой создания трехуровневых и других РМР. Повышение уровней РМР служит хорошей базой разнообразия декоративной обработки поверхностей деталей изделий.

На рис. 2.40, а–г показаны примеры поверхностей с РМР различных деталей. Структура обозначения поверхностей с ПРМР (в ГОСТ 24773–81 ПРМР обозначен сокращенно РМР) приведена на рис. 2.40, д; с ЧРМР — на рис. 2.40, е.

Контроль вида и значений параметров РМР может быть осуществлен полностью безаппаратно, достаточно проверить расчет значений параметров режима виброобработки ППД, применяемый инструмент и настройку станка на рассчитанный режим или программу в случае вибронакатывания (вибровыглаживания) на станках с ЧПУ. Такой способ контроля практически полностью решает

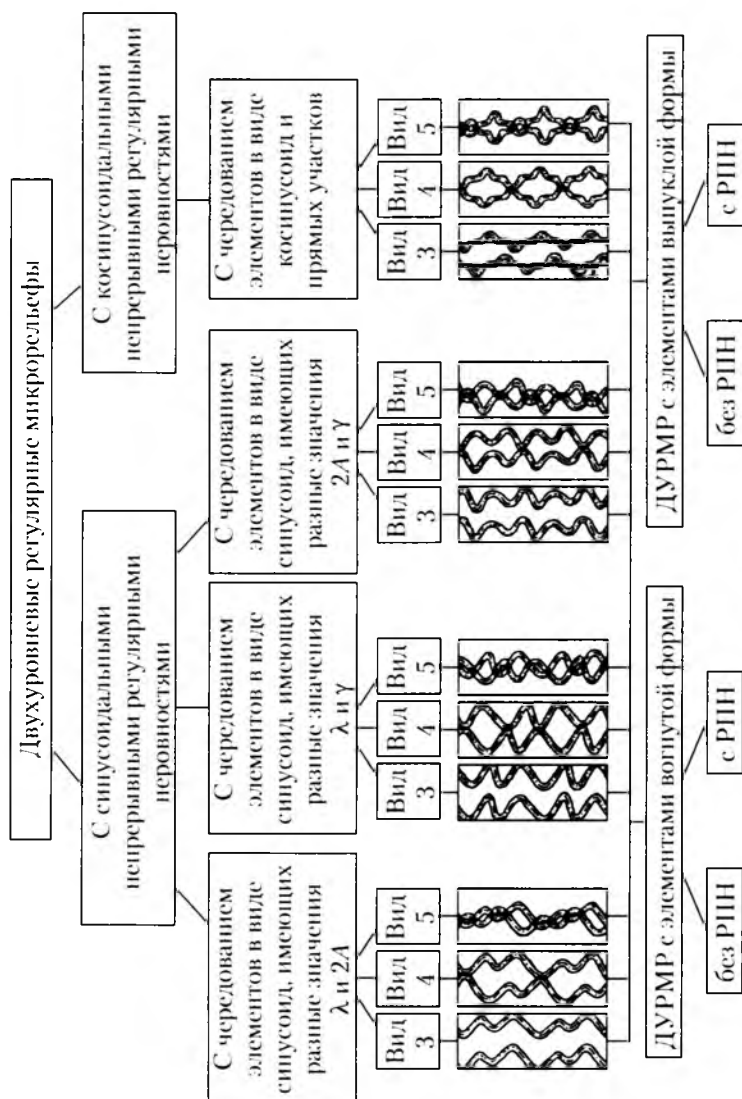


Рис. 2.39. Классификация ДУРМР

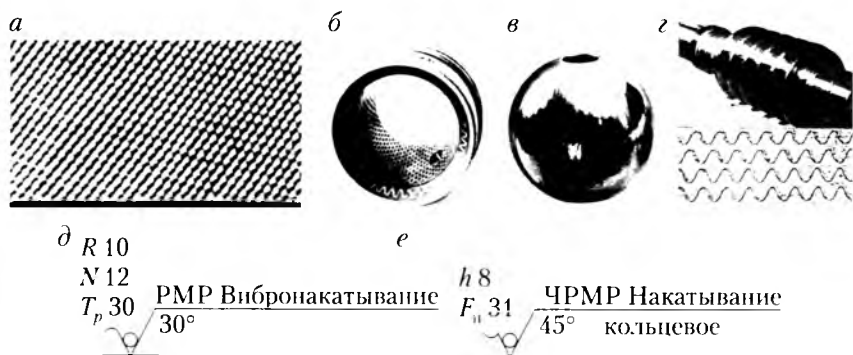


Рис. 2.40. Поверхности с регулярным микрорельефом:

a — плоская; b — внутренняя коническая и торцевая; c — сферическая; d — винтовая; обозначения поверхностей с RMP: d — ПРМР; e — ЧРМР

весьма сложную проблему контроля микрогеометрии при изготовлении деталей в автоматическом режиме.

Можно сказать, что альтернативы регуляризации микрогеометрии нет. Но развитие и использование в промышленности нового направления тормозило отсутствие его стандартизации. В результате теоретических обобщений и научно-экспериментальных исследований в 1981 г. был разработан, утвержден и с 1 июля 1982 г. введен в действие ГОСТ 24773–81 «Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики» [17]. В 1987 г. стандарт пролонгирован для использования без ограничения срока.

Этот стандарт по уровню совершеннее действующего отечественного стандарта на шероховатость поверхности (ГОСТ 2789–73) и национальных стандартов других стран. В нем исключены основные недостатки стандартов на шероховатость поверхности, и прежде всего наличие трудноизмеряемых трех высотных и двух шаговых параметров шероховатости поверхности, что усложняет использование стандартов; четыре из шести параметров представлены в виде средних значений, что снижает точность нормирования шероховатости и затрудняет контроль; шероховатость поверхности рассматривается в одном сечении, отсутствуют наиболее информативные площадные параметры; отсутствует также один из наиболее информативных параметров — число выступов и впадин на единицу

площади поверхности; стандарт не учитывает присущие поверхностям вязкопластичных материалов ПН и рассчитан лишь на аппаратный контроль.

Основным достоинством нового стандарта является возможность аналитического расчета значений большинства параметров как функций значений параметров режима виброобработки ППД. Таким образом, становится возможным расчетное технологическое обеспечение заданной микрогеометрии поверхностей деталей машин и приборов, что значительно повышает их качество и надежность.

На базе ГОСТ 24773–81 разработан проект международного стандарта «Поверхности с регулярным микрорельефом (РМР). Этот проект находится на рассмотрении Международного комитета по стандартизации ISO/TC57/SC2. Учтены вопросы регуляризации микрогеометрии поверхностей в ряде действующих и разрабатываемых нормативных документов.

2.3.3. Инструмент для ППД и приспособления для безвибрационной обработки

Разновидности инструмента для ППД показаны на рис. 2.41. При ППД используются: для безвибрационной обработки — шары, алмазные, твердосплавные и минералокерамические наконечники, конические, прямые, сферические, закругленные, с цилиндрической ленточкой, с торцовой поверхностью ролики, дорны (рис. 2.41, *а–г, ж–и*); для вибрационной обработки с источниками вибрации — шары и наконечники со сферической рабочей поверхностью (рис. 2.41, *а, б*); для вибрационной обработки без источников вибрации — фасонные клиновидные для обработки галтелей валов и наклонные ролики (рис. 2.41, *д*), профильные синусоидальные и косинусоидальные с постоянными и переменными параметрами ролики (рис. 2.41, *е*), для ультразвуковой обработки — специальные метчики-раскатники (рис. 2.41, *к*), резбовые ролики, полуволновые концентраторы 1 с рабочими элементами 2 в виде твердосплавных пластин со сферической поверхностью (рис. 2.41, *л*).

Обычно используются шары от покупных шарикоподшипников из хромистой стали типа ШХ15. Ролики всех разновидностей, как правило, изготавливаются из сталей У12А, ХВГ, ШХ5, 9ХС, 8Х4В2,

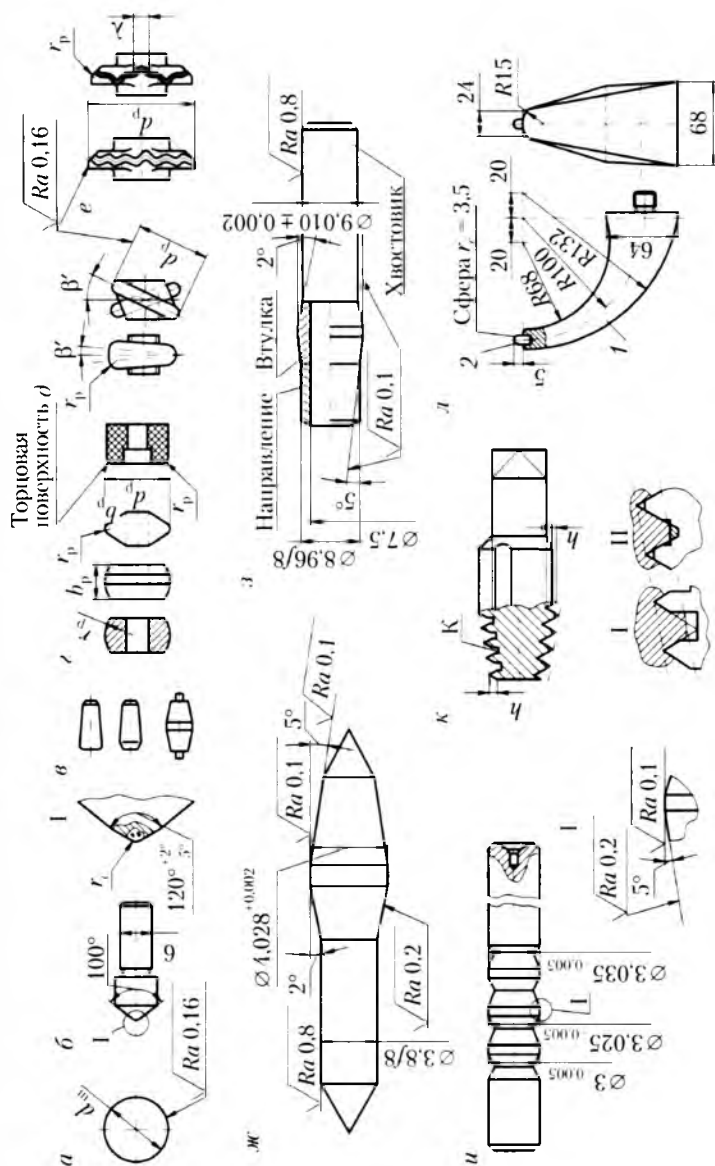


Рис. 2.41. Инструменты для обработки ИИД:

a — шар; b — алмазный наконечник; v — конические ролики; γ — прямые ролики; d — фасонные ролики; e — профильные ролики; $ж$ — однозубый цельный (монокитный) дорн; $з$ — однозубый сборный дорн; $и$ — трёхзубый цельный дорн; $к$ — специальный метчик-раскатник; $л$ — криволинейный концентратор с рабочим элементом

твердых сплавов ВК6М, ВК8М, минералокерамики марки ЦМ-332 и других марок. Минералокерамические ролики (рис. 2.41, *г* — крайний справа) конструкции Г.П. Мосталыгина и других, имеющие цилиндрическую или торцовую поверхность, используются для ротационного выглаживания. При этом наряду с поступательным движением вдоль обрабатываемой поверхности ролик сообщается за счет сил взаимодействия с обрабатываемой поверхностью еще и вращательное движение вокруг геометрической оси, которая перпендикулярна или наклонена к направлению подачи. Постоянная смена участка контакта инструмента с поверхностью при непрерывном вращении ролика, активное воздействие смазочно-охлаждающих средств, непосредственно подаваемых на рабочую поверхность инструмента, периодическое восстановление на ней адсорбированных пленок, оксидов, малая теплопроводность, высокие адгезионная стойкость, твердость и красностойкость инструментальной минералокерамики позволяют при высокой стойкости инструмента обеспечивать скоростное высокоэнергетическое воздействие на поверхность и подповерхностный слой материала заготовок деталей. За счет специфических условий деформации в подповерхностном слое формируются мелкодисперсная структура и остаточные напряжения сжатия в сочетании с высокой твердостью обработанного ППД материала и малой шероховатостью обработанной поверхности.

Ротационное выглаживание минералокерамическими роликами выполняется со скоростями и подачами, в 2–3 раза превышающими максимально допустимые при обычных схемах обработки. При выглаживании рабочих поверхностей заготовок из стали 40Х с исходной твердостью 180...197 НВ и шероховатостью по $Ra = 1,2...2,8$ мкм торцовым роликом из минералокерамики ЦМ-332 при скорости $v = 100...120$ м/мин, подаче $S = 0,2...0,3$ мм/об достигается шероховатость поверхности по $Ra = 0,08...0,2$ мкм; степень упрочнения (C_y) 80...120 %; толщина t_σ упрочненного слоя 180...260 мкм, сжимающие остаточные напряжения σ 1200...1320 МПа, мелкозернистая структура подповерхностного слоя материала с ярко выраженной текстурой. Стойкость ротационного ролика-выглаживателя составляет 100...120 мин.

Дорны изготавливаются из сталей 8ХФ, 38ХМЮА, 9ХС, ХВГ, ШХ15. Они могут изготавливаться также из твердых сплавов ВК6,

ВК8, Т15К6. Наиболее износостойкими инструментами являются твердосплавные цельный (рис. 2.41, ж) и сборный (рис. 2.41, з). У сборного дорна направляющая часть выполнена из стали ХВГ или ШХ15, втулка — из сплава ВК8, хвостовик — из стали 45, пайка осуществлена латунью. Достаточно стойкими являются и стальные хромированные (сталь ХВГ, твердость 63...65 HRC, толщина слоя покрытия — 10 мкм) с последующим сульфидированием (рис. 2.41, и) [5, 6].

Метчики-раскатники изготавливаются из сталей, 18ХГТ, ШХ20СГ, 20Х2Н4ВА, Р18, Р6М5К5. Для ультразвукового раскатывания резьб используются специальные метчики-раскатники (рис. 2.41, к). При использовании этих инструментов формирование резьбового профиля осуществляется по комбинированной схеме, позволяющей наиболее полно использовать ультразвуковую (акустическую) энергию на каждом этапе ППД. Для обеспечения комбинированной схемы резьбовой профиль нечетных граней заборной части выполнен с плоской прямоугольной канавкой K и соответственно высота четных граней уменьшена на величину $h = 0.2...0.3$ мм. При введении в зону деформации ультразвуковых колебаний пластические свойства обрабатываемого материала улучшаются и начинается интенсивное заполнение профиля нечетных граней (рис. 2.41, к, I). Окончательное формирование резьбового профиля осуществляется четными гранями метчика-раскатника (рис. 2.41, к, II). В результате повышается стойкость инструмента и улучшается качество обработанной поверхности. При этом на вершинах сформированного резьбового профиля не образуется складок и расслоений металла, что весьма важно для изготовления внутренних резьб повышенной точности [6].

Криволинейный волновод-концентратор 1 для обработки ППД желоба наружных колец шарикоподшипников на ультразвуковой установке на базе желобошлифовального станка мод. ЛЗ-29П (рис. 2.41, л) изготавливается из сталей 30ХГСА, 45, 50. Рабочий элемент 2 концентратора может быть в виде шара из стали типа ШХ15 (соединяется с концентратором с помощью гайки-сепаратора) и в виде сферического наконечника из твердых сплавов группы ВК (приспаяются твердыми припоями марок ПСр40, ПСр45, ПСр50, КД). Стойкость инструмента с рабочим элементом из сплава ВК8 является наибольшей и достигает 4 ч. [4, 6]. Пер-

спективными материалами для волноводов-концентраторов будущего являются титановые сплавы. Они обладают минимальными потерями и обеспечивают наибольшее значение амплитуды колебаний на торце волноводов. Например, амплитуда колебаний волновода-концентратора из титанового сплава ВТ8 вдвое превышает по значению амплитуды на волноводе-концентраторе из стали 45. Возможно изготовление волноводов-концентраторов из алюминиевых сплавов, но по прочностным показателям они значительно уступают стальным и титановым и поэтому применяются значительно реже [6].

Актуальным для современного машиностроения является применение оснастки для ППД в автоматизированных производствах. Одним из неперенных условий использования оснастки для ППД на ГПС, многоцелевых и других станках с ЧПУ является наличие у нее хвостовиков и других присоединительных элементов, обеспечивающих быструю автоматическую установку ее на оборудовании, желательно исключение необходимости автономного присоединения к энергетическим и другим магистралям, обеспечение компактности, малых масс и габаритных размеров, а также гибкости (возможность переналадки) за счет наличия в ней сменных и регулируемых по положению элементов.

Сменные шаровые и роликовые головки переналаживаемых приспособлений для ППД показаны на рис. 2.42 [4, 6]. В корпусе 2 головки (рис. 2.42, а) на осях 3 установлены четыре шарикоподшипника 4, на которые опирается шар 6. Шар удерживается от выпадания крышкой-сепаратором 5, закрепленным на корпусе 2 винтами 1. В головке (рис. 2.42, б) шар 4 расположен в корпусе 3 и опирается на фторопластовую опору 2 и боковые вставки. Корпус-сепаратор 3 посредством резьбы соединяется с державкой 5 приспособления и удерживается от самооткручивания гайкой 1. Износ опоры 2 и сепаратора можно компенсировать дополнительным накручиванием корпуса-сепаратора 3 на державку 5.

В головке (рис. 2.42, в) предусмотрено автоматическое компенсирование износа опоры 6 и сепаратора 4. Возрастание зазоров между конусной поверхностью сепаратора 4 и шаром 7 устраняется поджатием втулки 5 с фторопластовой или другой опорой 6 пружиной 3, сжатие (натяг) которой обеспечивается гайкой 1, фиксируемой в нужном положении контргайкой 2. Головка для

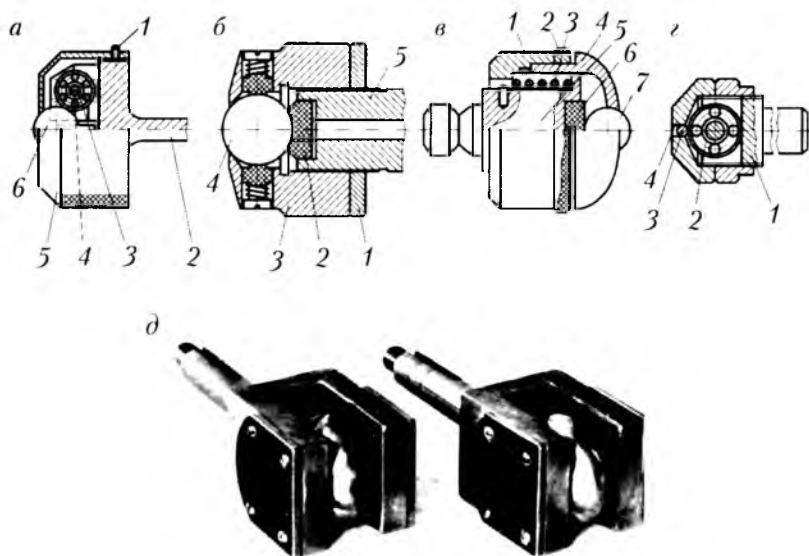


Рис. 2.42. Сменные шаровые (а, б, в, г) и роликовые (д) головки

накатывания шарами малого диаметра ($d_{\text{ш}} \leq 2$ мм) показана на рис. 2.42, г. Рабочий шар 4 опирается на опорный шар 3, который, в свою очередь, контактирует с шарикоподшипником 2, расположенным на оси в корпусе 1 головки. Опорный шар является как бы промежуточной опорой, так как без нее, даже при использовании шарикоподшипников минимальных размеров, не удастся разместить рабочий шар малого диаметра ($d_{\text{ш}} = 1...2$ мм) и шарикоподшипник в сепараторе.

Роликовые головки в виде сменных вилок оснащены гладкими или профильными (рис. 2.42, д) роликами, которые устанавливаются на осях или цапфах в подшипниках качения или скольжения вилок.

Одношаровые переналаживаемые приспособления с упругим поджатием инструмента рычажного типа для обработки на строгальных и карусельных станках с ЧПУ и раскатное для обработки отверстий большого диапазона диаметров на восьмишпиндельном токарном полуавтомате показаны на рис. 2.43 [15, 16]. В приспособлении рычажного действия (рис. 2.43, а) шар 1 расположен в сепараторе 2 и опирается на шарикоподшипник 3, установленный

посредством оси 4 в вилке 5, которая установлена хвостовиком в рычаге 7. Рычаг 7 с помощью оси 6 шарнирно соединен с корпусом 8 приспособления и находится под действием предварительно сжатой гайкой 9 пружины 10, которая надета на тягу 11 с головкой, имеющей сферическую поверхность для полного контактирования с выточкой паза рычага 7 при его повороте. Сепаратор 2 удерживается на цилиндрической поверхности вилки 5 стопорным винтом 12.

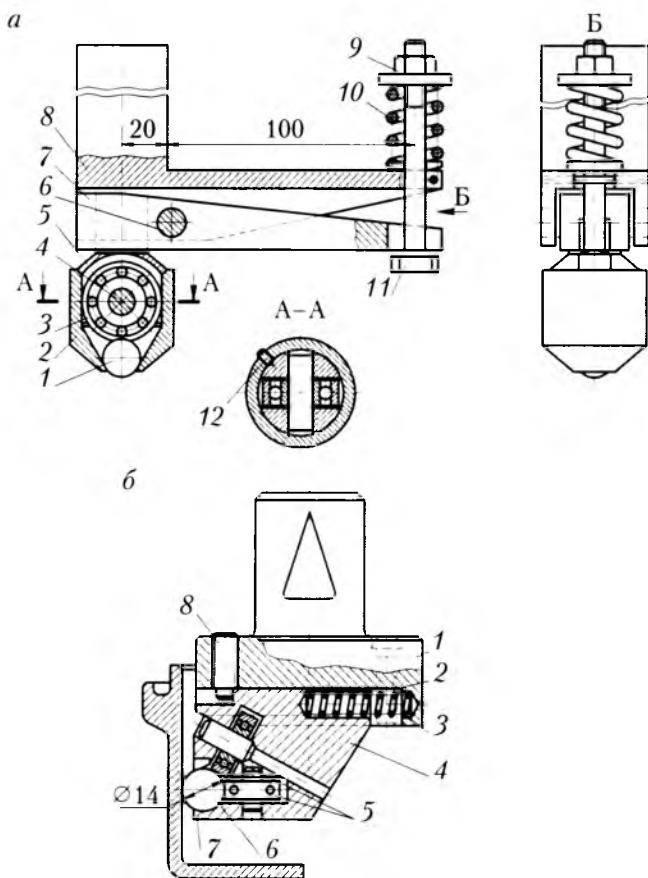


Рис. 2.43. Одношаровые переналаживаемые приспособления: рычажного действия для строгальных и карусельных станков с ЧПУ (а) и раскатное для восьмишпиндельных токарных полуавтоматов (б)

Раскатное приспособление (рис. 2.43, б) используется на восьмишпиндельных полуавтоматах для раскатывания за один проход отверстий в барабанах как одного из переходов токарной операции (материал детали — серый чугун СЧ15, твердость 163...229 НВ, диаметром отверстия заготовки $D_3 = 420$ мм, параметры режима ППД: $P = 700...900$ Н, $n_3 = 86$ мин⁻¹, $S = 0,18$ мм/об, диаметр шара $d_{ш} = 14$ мм). В направляющих 2 корпуса 1 размещен подпружиненный пружиной 3 ползун 4, в котором на осях под углом друг к другу расположены шарикоподшипники 5, воспринимающие давление контактирующего с ними и удерживаемого сепаратором 7 шара 6. Стопором и упором для ползуна 4 является винт 8.

На рис. 2.44 представлены многороликовые переналаживаемые приспособления с упругим элементом конструкции НИИТракторсельхозмаш. Благодаря наличию упругого элемента, выполненного в виде полого конуса с толщиной стенки 1,5...3,0 мм, обеспечивается упругий контакт конических роликов с обрабатываемой поверхностью, что исключает возможность перенаклепа металла. В приспособлении (рис. 2.44, а) полый упругий элемент 1 изготовлен из пружинной стали 65Г с наружной конусной рабочей поверхностью, на которую опираются конические ролики 2, удерживаемые сепаратором 3 от выпадания. При обработке чугуна используются меньшие подачи по сравнению с подачами при обработке сталей и недопустим разворот роликов относительно оси вращения за счет зазоров между сепаратором 3 и роликами 2, так как это приводит к самоподаче приспособления до $S = 0,75...1,25$ мм/об, что крайне нежелательно при обработке чугуна. Для предотвращения самоподачи из-за самопроизвольного разворота роликов сепаратор 3 во время работы должен быть зажат между радиально-упорными подшипниками 4, а при обратном ускоренном перемещении (выводе из отверстия) необходимо уменьшение диаметра приспособления, что осуществляется описанным ниже образом.

В конце рабочего хода шток 10 упирается в специальный упор на станке и, перемещаясь вправо (для станков с вертикальным расположением шпинделя — вверх), сжимает пружину 7. При этом штифт 9, скользя по наклонному пазу штока 10, выводит палец 8 из отверстия во втулке 6, которая под действием пружины 7 вместе с подшипниками 4 и сепаратором 3 передвигается в крайнее

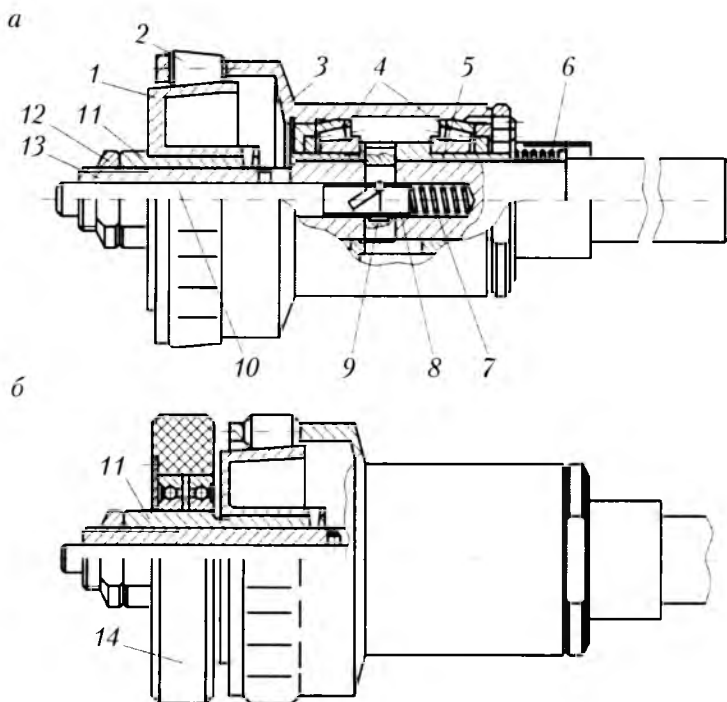


Рис. 2.44. Многороликовое приспособление для обработки ППД отверстий в заготовках из чугуна

левое положение, что приводит к перемещению роликов 2 по конусу элемента 1 и уменьшению диаметра приспособления по расположению крайних наружных точек роликов.

После вывода приспособления из обработанного отверстия и при движении его в обратном направлении сепаратор 3, встречая своим уступом кольцевой упор на станке и преодолевая сопротивление пружины 5, отводится в крайнее правое положение. Под действием сжатой пружины 7 шток 10 перемещается влево. При этом перемещаемый по наклонному пазу штифт 9 вводит палец 8 в отверстие втулки 5, вновь жестко фиксируя положение сепаратора 3.

Для изменения настроечного размера приспособления служат контргайка 12 и гайка 11, при вращении которой конусный элемент 1 перемещается по корпусу (оправке) 13. Для обработки отверстий

большой длины приспособление дополнительно оснащается направляющей шайбой 14, расположенной на гайке 11 на двух шарикоподшипниках (рис. 2.44, б).

На рис. 2.45 приведен дорн конструкции автора с лысками и схема групповой обработки ППД. В дорне (рис. 2.45, а) рабочая поверхность деформирующих зубьев 1 и 2 выполнена в виде сопряженных между собой и расположенных по периметру под углом α зубьев выпуклых участков А (выпуклостей), ограниченных в радиальном направлении цилиндрической поверхностью Б диаметром d , а в осевом — заборным конусом Г с углом θ_1 и обратным конусом Е с углом θ_2 и плоских участков в форме лысок В, расположенных относительно выпуклостей под углом β и образующих с касательными в точках сопряжения выпуклостей и лысок угол $\varphi \leq 30^\circ$. При этом в каждом из последующих деформирующих зубьев упомянутые участки расположены в шахматном порядке относительно предыдущего зуба с перекрытием по длине l_2 лысок предыдущего зуба выпуклостями с длиной по хорде l_1 последующих зубьев на величину $2C$, а число z зубьев, длины l_1 , l_2 и фактическое значение угла φ в новом дорне связаны между собой зависимостями:

$$z = \frac{d}{2lgd}; \quad l_1 = m_1 d \sin(\pi/2z);$$

$$l_2 = m_2 d \sin(\pi/2z); \quad \frac{l_1}{l_2} = 1,1;$$

$$\varphi = \arctg\{d[1 - \sin(\pi/2z)]/l_2\} \leq 30^\circ,$$

где m_1 , m_2 — постоянные коэффициенты, равные соответственно 1,05 и 0,95.

Калибрующий зуб 3 диаметром d_1 предназначен для калибрования обработанного деформирующими зубьями отверстия.

В процессе дорнования по групповой схеме (рис. 2.45, б) выпуклости зуба 1 обрабатывают в отверстии с абсолютным натягом $i_a = d - D_3$ (здесь D_3 — диаметр отверстия заготовки 4) продольные полосы шириной по хорде l_1 , а на продольную переходную ленточку поверхности шириной $\frac{i_a}{2tg\varphi}$ воздействуют кромками лысок в направлении F под углом $\geq 60^\circ$ к обрабатываемой поверхности диаметром D_3 , не вызывая выдавливания материала в стороны. Затем

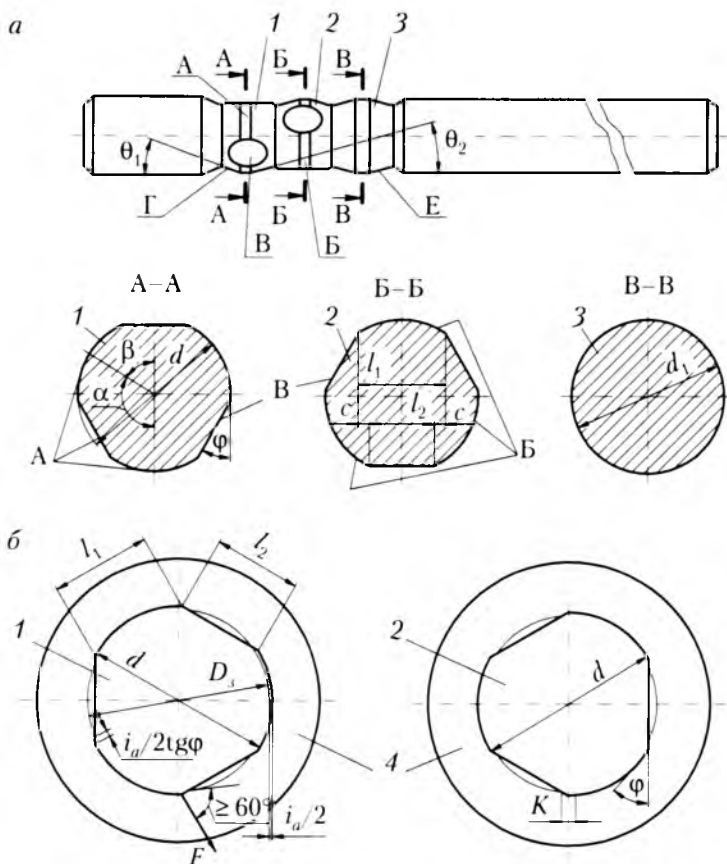


Рис. 2.45. Дорны (а) для реализации групповой схемы (б) обработки ППД

зуб 2 своими выпуклостями также с натягом i_a деформирует оставшиеся необработанными полосы отверстия с перекрытием уже обработанных полос на величину $K = C + (i_a / \tan \phi)$, здесь $C = (l_1 - l_2) / 2$. Таким образом, полностью исключаются наплывы материала на стыках полос поверхности, а последующее калибрование зубом 3 обеспечивает высокое качество поверхности отверстия.

Инструмент и схема дорнования особенно эффективны при дорновании отверстий малого диаметра (3Н7–6Н7) в заготовках из меди М1Т, стали 12Х18Н10Т, никелевого ХН67ВМТЮ и тита-

нового ВТЗ-1 сплавов. При этом достигается шероховатость до $Ra = 0,17$ мкм, повышается точность диаметральных размеров до 2,5 раза, уменьшается овальность и конусность отверстий в 2 раза, обеспечивается степень упрочнения C_y подповерхностного слоя материала 26 %.

2.3.4. Приспособления для вибрационной обработки ППД с источниками вибрации

Устройства, представленные на рис. 2.46 и 2.47 [6, 9], предназначены для вибрационной обработки ходовых винтов станков и червяков. Устройство на рис. 2.46 включает основание 2, стойку 1 и электромотор 4, на валу которого через эксцентрик 3 крепится кулиса 14, связанная посредством оси 13 со стойкой 1. На кулисе 14 с помощью осей 10, 12 и гаек 15 установлены симметрично расположенные относительно друг друга два комплекта держателей 5, 9.

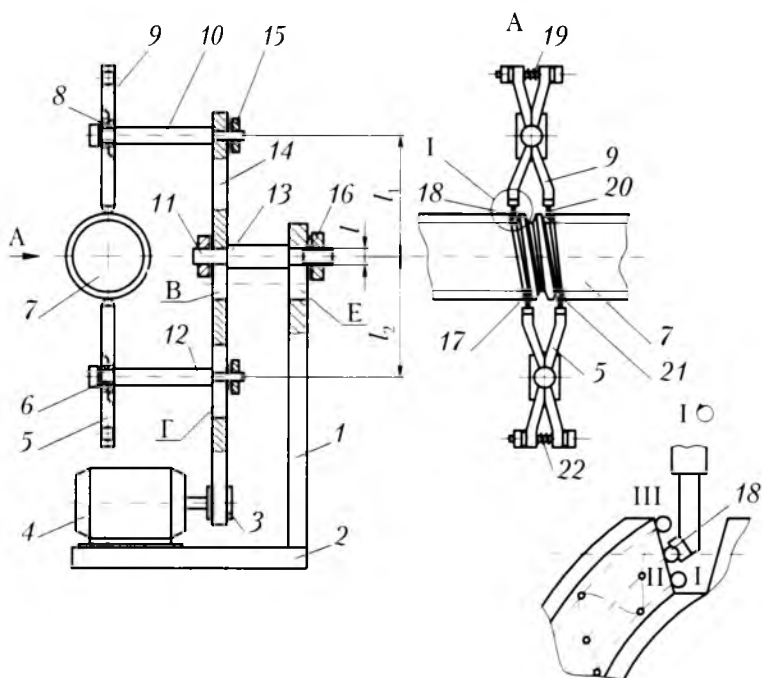


Рис. 2.46. Устройство для вибронакатывания поверхностей винтов

представляющие собой попарно соединенные посредством подшипников 6, 8 и силовых пружинных механизмов (болтов и пружин) 19, 22 двухплечевые рычаги, в которых установлены инстру-

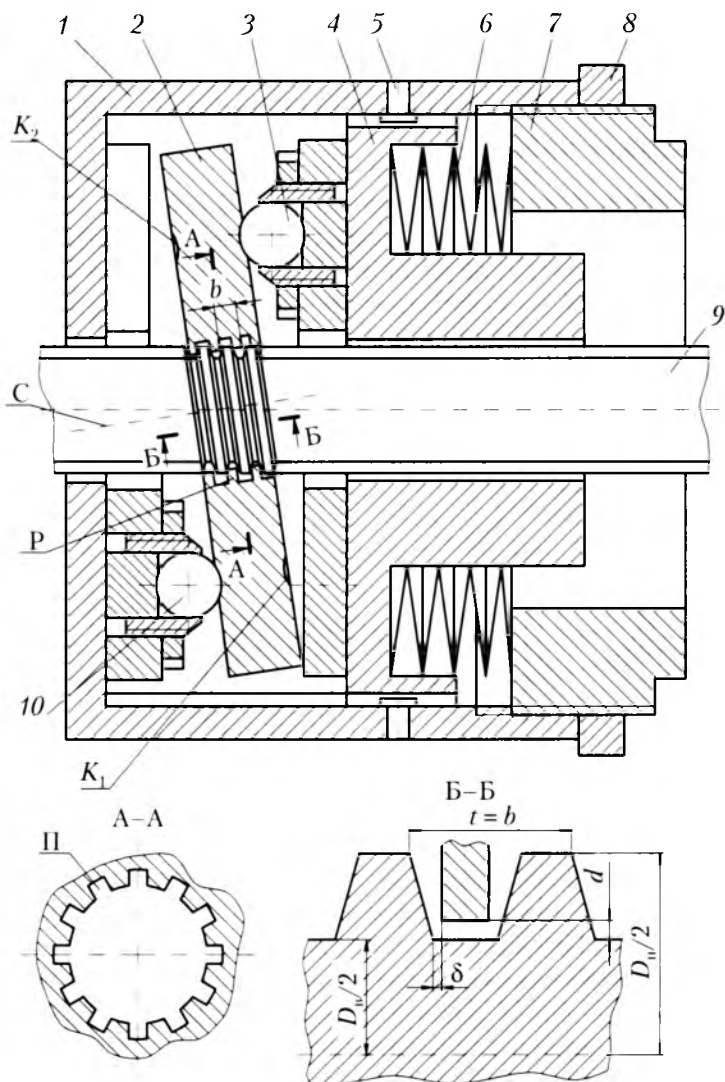


Рис. 2.47. Устройство для виброударного обкатывания винтовых поверхностей

менты для обработки ППД (шары, алмазные наконечники) 17, 18, 20, 21.

В стойке 1 и кулисе 14 имеются пазы В, Г, Е, в которых можно перемещать и закреплять гайками 11, 16 в разных положениях оси 12, 13 с целью настройки приспособления на требуемый размер обрабатываемой заготовки и обеспечения режима обработки за счет изменения плеч l_1 и l_2 кулисы 14.

Устройство устанавливается на суппорте, а обрабатываемая заготовка 7 — в центрах токарно-винторезных станков. Перемещением оси 12 в пазу Г кулисы 14 инструменты 17, 21 устанавливаются на размер заготовки так, чтобы точки контакта всех инструментов в нулевом положении располагались на среднем диаметре винтового профиля заготовки 7. После этого устанавливается сила P поджима инструментов к обрабатываемой поверхности с помощью пружинных механизмов 19, 22. Затем перемещением оси 13 в пазах В и Е стойки 1 и кулисы 14 на соответствующую величину l изменяется соотношение плеч l_1 и l_2 и этим обеспечивается требуемая амплитуда колебаний инструментов. При включении приводов станка и устройства (электродвигателя 4) от эксцентрика 3 кулиса совершает возвратно-поступательное и колебательное движения, которые передаются на держатели с инструментами и они начинают совершать возвратно-поступательное и колебательное движения во взаимнопротивоположных фазах, формируя синусоидальные следы (канавки) по высоте профиля винтовой поверхности (точки I, II, III), а вращение заготовки и подача S (мм/об) суппорта с устройством, равная шагу винтовой поверхности заготовки, обеспечивают формирование синусоидальных следов вдоль образующей винтовой поверхности.

На поверхностях винтовых профилей с помощью устройства могут образовываться как ПРМР, так и ЧРМР вида 3 (при $l_1 = l_2$) и видов 4, 5 (при $l_1 \neq l_2$). Ходовые винты, червяки и другие подобные детали с РМР рабочих поверхностей обладают повышенной маслостойкостью (ЧРМР), высокой несущей способностью поверхностей (ПРМР), лучшей теплоотводной способностью и повышенной в 1,5–2,0 раза износостойкостью [9].

С помощью устройства, изображенного на рис. 2.47, работающего по принципу ударного накатывания, можно формировать на винтовых поверхностях РМР, в том числе по предварительно

нанесенным на них антифрикционным покрытиям. Устройство содержит полый корпус 1, установленные в нем деформирующий инструмент 2 и силовой механизм, состоящий из втулки 4, набора тарельчатых пружин 6, гайки 7 и контргайки 8. Втулка 4 удерживается от вращения в корпусе 1 шпонками 5 и может перемещаться вдоль оси. Инструмент 2 выполнен в виде гайки с внутренней прямоугольной резьбой Р, шаг в которой равен шагу обрабатываемого винта 9, а число витков от 3 до 4. Инструмент резьбой свободно посажен на обрабатываемый винт 9 с образованием осевого δ и радиального d зазоров между витками инструмента 2 и обрабатываемого винта 9. Резьба Р инструмента имеет сквозные продольные пазы П в виде шлицев, равномерно расположенных по окружности и параллельных оси С инструмента 2.

Инструмент 2 установлен с помощью пары аксиально разнесенных шаровых опор качения 3 и 10, контактирующих своими шарами с беговыми дорожками — направляющими K_1 и K_2 на торцовых поверхностях инструмента. Шаровая опора 3 жестко закреплена на втулке 4 силового механизма, а шаровая опора 10 — на корпусе 1.

При работе устройство корпусом 1 устанавливается в патроне токарно-винторезного станка с тарельчатыми пружинами в свободном состоянии. Обрабатываемый винт 9 сначала ввинчивается на несколько витков в отверстие инструмента 2, а затем устанавливается в люнетах станка. После этого гайкой 7 создается необходимое сжатие набора пружин 6, под воздействием которых втулка 4 перемещается по шпонкам 5 и через шаровую опору 3, контактирующую с беговой дорожкой K_1 , передает силу сжатия пружин на инструмент 2, поджимая его к опоре 10. При этом возникает аксиальное нагружение инструмента, и он из-за наличия зазоров δ и d между его резьбой и резьбой обрабатываемого винта занимает наклонное положение. В процессе вращения корпуса устройства вместе с силовым механизмом и при аксиальном воздействии шаровых опор 3 и 10 на инструмент на локальных участках резьб Р и обрабатываемого винта 9 возникают нормальные контакты.

Положение участков контактов зависит от места приложения аксиальной силы по длине окружности беговых дорожек K_1 и K_2 инструмента. Поскольку контакты происходят по винтовой поверхности обрабатываемого винта 9, то вращательное движение

инструмента 2 связано с поступательным его движением относительно винта без проскальзывания. При этом ось C инструмента 2 совершает прецессионное движение, а сам инструмент — сложное волнообразное (обкаточное) движение с одновременным поворотом вокруг своей оси.

Таким образом, прецессионное движение оси C инструмента 2 относительно оси обрабатываемого винта вызвано аксиальным нагружением инструмента и зазорами в осевом δ и радиальном d направлениях между резьбами P и винта. При $\delta = d$ зазор рекомендуется определять по формуле

$$\delta = d = \frac{D_n}{2} \left[\frac{D_n D_b}{2nt - (D_n - D_b)} \right],$$

где D_n и D_b — наружный и внутренний диаметры резьбы обрабатываемого винта; n — количество витков резьбы в инструменте; t — шаг резьбы винта.

Наличие на резьбе инструмента продольных пазов (шлицев) обеспечивает возникновение ударных воздействий деформирующих элементов (выступов) на обрабатываемую винтовую поверхность с образованием на ней ЧРМР вида 1 по всей образующей профиля резьбы. При обработке винтовых поверхностей с предварительно нанесенным антифрикционным покрытием ударные воздействия, активизируя слой покрытия и тонкий слой металла основы, интенсифицируют физико-химические процессы, вызывают явление ускоренного массопереноса между частицами покрытия и металла основы, что способствует диффузионным процессам, формированию подповерхностного слоя детали при высокой адгезии покрытия и металла основы. Кроме того, ударное обкатывание приводит к более полному заполнению впадин неровностей исходной поверхности материалом покрытия, что улучшает качество рабочих поверхностей, их прирабатываемость, износостойкость, противозадирность и другие эксплуатационные свойства деталей.

С целью формирования и отделочно-упрочняющей обработки внутренних резьб методом ППД используются устройства для ультразвукового раскатывания конструкции Самарского ГТУ. Раскатывание резьб диаметром до 60 мм с воздействием ультразвука осуществляется посредством приспособления (многошпиндельной головки) с инструментом в виде специального метчика-раскатника,

показанного на рис. 2.41, к. Особенностью устройства, представленного на рис. 2.48, *а*, является расположение колебательной системы вне приспособления с инструментом, с противоположной относительно инструмента 6 стороны обрабатываемых отверстий заготовки 4. Колебательная система состоит из магнитострикционного преобразователя 9 и концентратора 7 и закреплена на подвижном поршне 8 гидроцилиндра 1. К концентратору жестко крепится диск 2 с волноводами 3 стержневого типа, осуществляющими в процессе раскатывания резьбы постоянный акустический контакт с метчиками-раскатниками 6, которые установлены в приспособлении в виде многошпиндельной головки 5. В конце цикла обработки сбросом давления в гидросистеме акустический контакт прерывается и инструменты при обратном вращении выходят (выкручиваются) из отверстий. Этим исключается взаимодействие вибрирующего инструмента с обработанной поверхностью резьбы при холостом ходе, в результате чего повышается точность

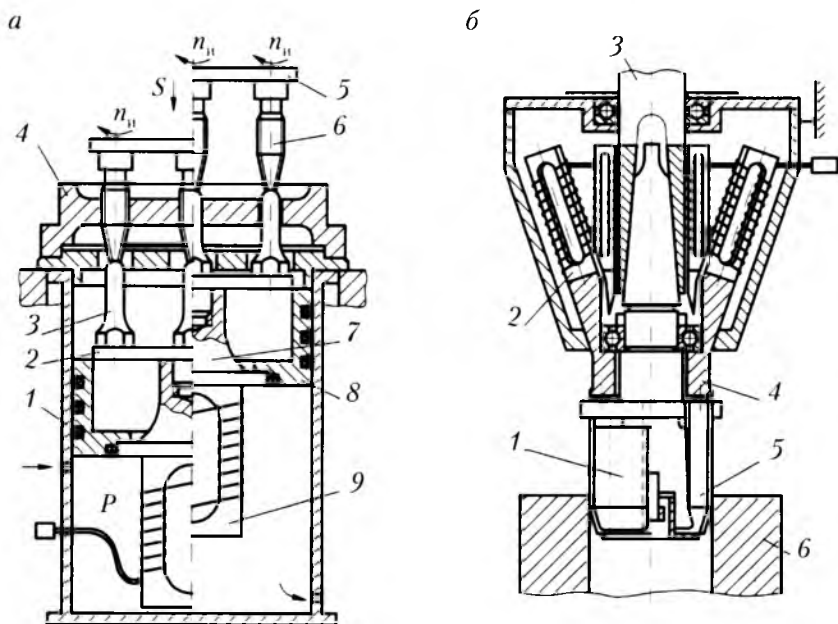


Рис. 2.48. Устройства для ультразвукового раскатывания резьб малого (*а*) и большого (*б*) диаметров

и уменьшается шероховатость обработанного ППД резьбового профиля. Вращение инструментов с частотой $n_{\text{н}}$ и подача S обеспечивается от шпинделя станка и пиноли шпиндельной бабки.

Таким образом, в описанном устройстве колебательная система вмонтирована в приспособление для установки заготовки, которое размещается на столе гидрофицированного станка многоцелевого назначения. При отключенной системе приспособление может использоваться для обычной обработки (сверления, растачивания, фрезерования и т.п.). Многошпиндельное приспособление для установки инструмента имеет один присоединительный элемент (конус) и может автоматически устанавливаться в вертикальный шпиндель станка и выниматься из него.

Для ультразвукового раскатывания резьб большого диаметра разработано устройство (рис. 2.48, б) с колебательной системой, состоящей из нескольких магнитострикционных преобразователей 2, связанных в кучности колебаний общим кольцевым фланцем 4. Формообразование, отделка и упрочнение резьбы здесь обеспечивается резьбораскатной головкой 1, рабочим элементом которой в виде резьбовых роликов 5 сообщаются ультразвуковые колебания. Колебательная система своим корпусом закрепляется неподвижно на шпиндельной бабке многоцелевого станка с ЧПУ, а приспособление для ППД в виде раскатной головки 1 своим коническим хвостовиком устанавливается в гнезде шпинделя 3 станка. Такое разделение устройства на две части позволяет использовать станок для многих видов обработки с ультразвуковой вибрацией и без нее (при отключенной колебательной системе) за счет автоматической смены инструментов и приспособлений для обработки резанием и ППД (накатные и выглаживающие головки, комбинированные инструменты, резцовые оправки, фрезы) при использовании одной ультразвуковой колебательной системы. В конструкции предусмотрено регулирование акустического контакта [6].

2.3.5. Приспособления для вибрационной обработки ППД без источников вибрации

Создание инструмента и приспособлений для вибронакатывания без источников вибрации снижает массу и габаритные размеры оснастки, не требует дополнительного подключения к энергосетям,

упрощает автоматическую установку на станки и снятие инструментальной оснастки с оборудования, улучшает условия работы и сохраняет длительное время точность многоцелевых станков с ЧПУ и ГПС за счет исключения вибрационного воздействия на них, сокращает энергетические затраты на обработку.

Первый опыт обработки ППД без источников вибрации имел место при применении фасонных клиновых и наклонных роликов (см. рис. 2.41, *д*) для вибронакатывания галтелей крупных деталей на Уралмашзаводе. В дальнейшем были созданы профильные синусоидальные и косинусоидальные ролики с постоянными и переменными параметрами, регулируемые наклонные ролики, другие инструменты и устройства для вибронакатывания и вибровыглаживания поверхностей деталей [6–9].

Регулируемое по углу наклона ролика устройство представлено на рис. 2.49. Оно состоит (рис. 2.49, *а*) из крышек 1, пластин 2, шарикоподшипников 3, штифта-стопора 4, пружины 5, державки 6, регулировочных гаек 7, вилки 8, ролика 9, винта 10, цапфы 11, шайб 12, гайки 13.

Ролик 9 диаметром d_p и радиусом скругления r_p сферической выточкой А установлен на сферическую часть Б цапфы 11. При этом штифт-стопор 4, установленный на резьбе в отверстии ступицы ролика, входит цилиндрическим хвостовиком в паз на сферической части цапфы и стопорится контргайкой. Гайка 13 наружной резьбовой поверхностью вкручивается в отверстие ролика 9, конической поверхностью Г упирается в сферическую часть цапфы и стопорится винтом 10. Цапфа 11 с роликом 9 установлена на шарикоподшипниках 3 в полуотверстиях вилки 8, которые накрыты съемными крышками 1 и предохраняются от загрязнения пластинами 2 и шайбами 12. Вилка 8 своим хвостовиком И входит в отверстие державки 6 и находится под воздействием силы P , обеспечиваемой тарированной пружинной 5, предварительное сжатие которой осуществляется перемещением регулировочных гаек 7 по резьбе хвостика вилки 8.

Наладка и работа устройства осуществляется следующим образом. На собранном устройстве ролик 9 в отжатом состоянии устанавливается по угломеру на заданный угол наклона β для обеспечения требуемого осевого биения $\delta = (d_p - 2r_p) \sin \beta$ рабочего профиля и предварительно фиксируется в этом положении закручиванием

штифта-стопора 4 до упора в дно паза В цапфы 11. Окончательная фиксация положения ролика на цапфе осуществляется закручиванием гайки 13 до упора конусной выточки Г в сферическую часть цапфы. после этого окончательно затягивается и фиксируется контргайкой штифт-стопор 4, предотвращающий отклонение от заданного положения и самооткрепление ролика 9 при знакопеременном кинематико-динамическом воздействии на него обрабатываемой поверхности заготовки 14 за счет расположения паза В под углом 45° к оси цапфы 11. Пазы Ж на ролике 9 и Е на гайке 13 служат для затягивания вилчатым ключом резьбового соединения ролик-гайка. Смазывание шарикоподшипников осуществляется консистентной смазкой (солидолом С) при снятых пластинах 2.

За счет угла наклона β , осевого биения δ рабочего профиля и перемещения точки контакта гладкого ролика в процессе вибронакатывания (рис. 2.49, б) на поверхность заготовки наносятся следы в виде синусоид с длиной волны $\lambda = \pi d_p$, амплитудой $2A = \delta$ и углом направления $\gamma = \arctg(4.92A/\lambda)$. Путем изменения угла наклона β ролика осуществляется переналадка приспособления и обеспечиваются следы обработки с различными параметрами $2A$ ($2A_1$; $2A_2$ и т.д.) и γ (γ_1 , γ_2 и т.д.) при одной подаче S на оборот заготовки. За счет изменения подачи указанным устройством можно обеспечивать образование как ПРМР, так и ЧРМР видов 3, 4 и 5 с различными значениями параметров $2A$ и γ на цилиндрических, плоских, фасонных и других поверхностях деталей с использованием токарных, фрезерных, строгальных, расточных и других станков.

Многоруликовые переналаживаемые устройства для вибронакатывания внутренних и наружных цилиндрических поверхностей показаны на рис. 2.50 и 2.51. Устройства содержат оправки 1, конические втулки 2, упорные шарикоподшипники 3, сепараторы 4, направляющие пальцы 5, ролики 6, упорные втулки 7 и контргайки 8.

При вращении заготовки с частотой n_3 , устройство, размещенное хвостовиком или державкой оправки 1, например, в патроне задней бабки или резцедержателе токарно-винторезного станка, перемещается с подачей S в осевом направлении. Ролики 6 имеют две конусные цапфы А, две опорные конические поверхности Б и рабочую поверхность В в виде выпуклости диаметром d_p и осевым

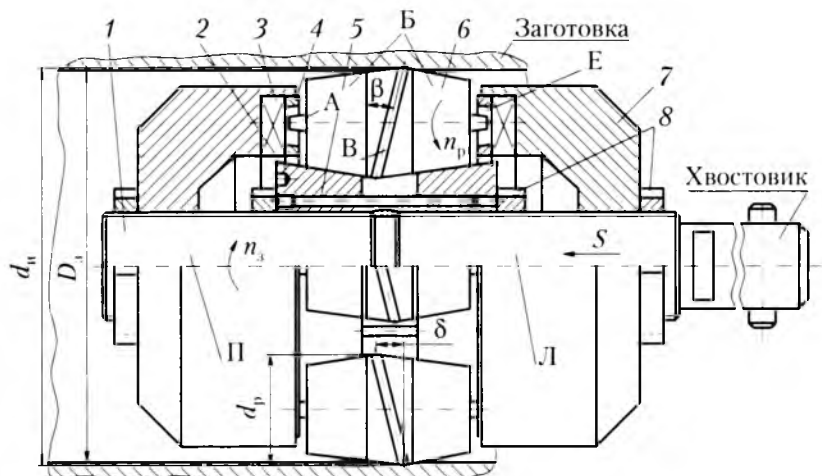


Рис. 2.50. Многороликовое устройство для виброраскатывания отверстий

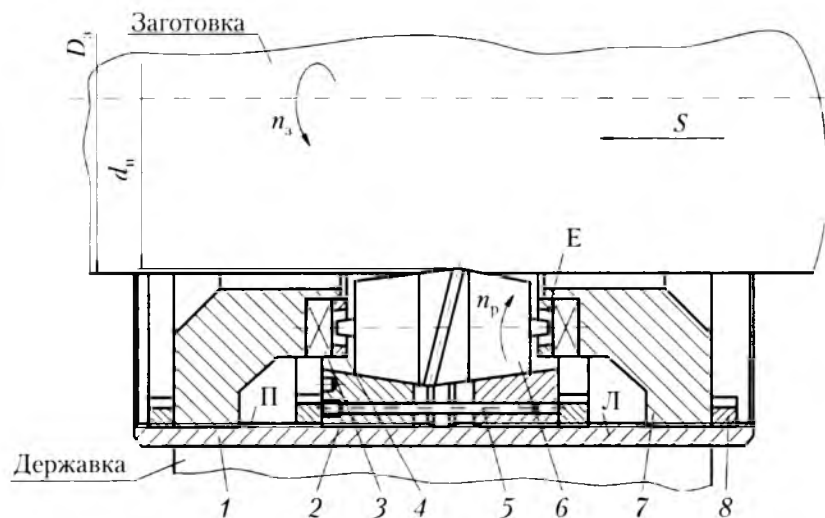


Рис. 2.51. Многороликовое устройство для виброобкатывания наружных цилиндрических поверхностей

бнением δ , обеспечиваемым расположением выпуклости под углом

$$\beta = \arctg\left(\frac{2\delta}{\pi d_p}\right).$$

Кольца сепаратора 4 снабжены несколькими комплектами радиальных конусных пазов Е, что позволяет увеличить их срок службы.

Ролики 6, размещенные конусными цапфами А в радиальных конусных пазах Е колец сепаратора 4 и опирающиеся опорными конусными поверхностями Б на конусные рабочие поверхности конических втулок 2, вращаются с частотой n_p и наносят на поверхность следы в виде синусоид с амплитудой $2A = \delta$, длиной $\lambda = \pi d_p$, что является основой образования на рабочих поверхностях деталей регулярных микрорельефов. Кольца сепараторов 4, воспринимающие осевые нагрузки на ролики 6, опираются на шарикоподшипники 3, размещенные в упорных втулках 7.

Для обеспечения переналадки устройств на обработку поверхностей другого диаметра конусные втулки 2 установлены на цилиндрических правой П левой Л резьбах оправки 1 и соединены направляющими пальцами 5. При вращении оправок они сдвигаются или раздвигаются без относительного поворота, так как соединены между собой пальцами 5. Втулки 7 также установлены на резьбовых поверхностях оправок 1 и в целях регулирования зазора между коническими цапфами роликов и пазами колец сепаратора и компенсации износа при вращении меняют осевое положение. Стопорение втулок 2 и 7 в заданных осевых положениях осуществляется контргайками 8.

Устройства настраиваются на определенный диаметр d_n положения выпуклостей роликов 6 для обеспечения абсолютного натяга i_a ($i_a = d_n - D_3$ при обработке внутренних и $i_a = D_3 - d_n$ при обработке наружных поверхностей). В зависимости от подачи S на поверхностях могут образовываться либо полностью, либо частично регулярные микрорельефы.

С помощью одного комплекта устройств, например, можно обрабатывать поверхности диаметром 50...56 мм. Ресурс безотказной работы устройств за счет использования всех комплектов пазов сепаратора увеличивается в 6 раз. Стоимость предложенных устройств по сравнению с устройствами, оснащенными обыкновенными коническими роликами (без наклона выпуклости), возросла

на 19 %, а снижение затрат на обработку вибронакатыванием одной заготовки при его использовании снижена в 4,9–6,4 раза [8].

На рис. 2.52, *а* представлено приспособление с набором профильных роликов для вибронакатывания наружных цилиндрических поверхностей на станках токарной группы. Оно состоит (рис. 2.52, *б*) из корпуса 1, сменной головки (вилки) 2, оси 3, шаровой опоры 4, упора 5, профильных роликов 6, тарированной пружины 7 и регулировочной гайки-крышки 8.

Все приведенные выше роликовые приспособления работают при наличии силы трения в направлении, противоположном подаче. С целью исключения указанного явления созданы приспособления, у которых ролики обкатываются по поверхности практически без проскальзывания [8, 9].

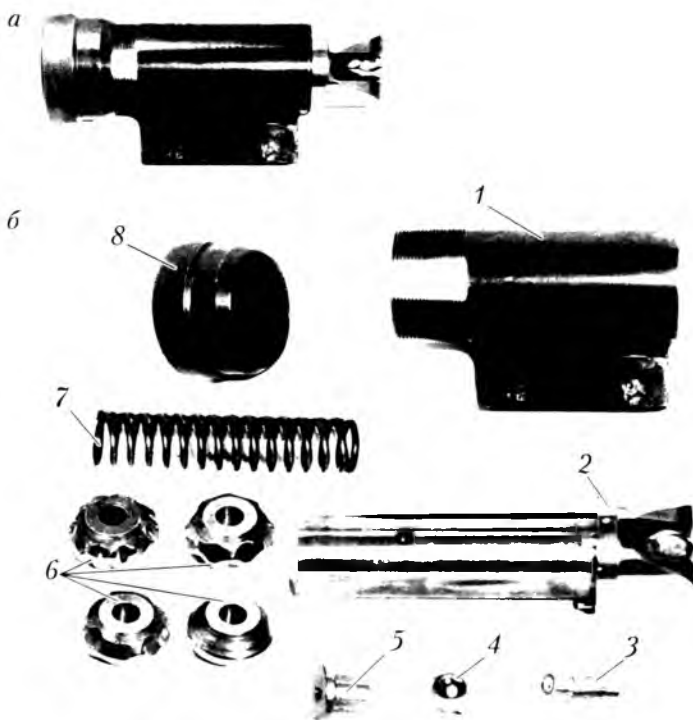


Рис. 2.52. Приспособление с профильным роликом (*а*) и его составляющие элементы (*б*)

На рис. 2.53 представлено приспособление со сменными роликовыми головками (вилками), показанными на рис. 2.42, д. Профильный ролик 17, посредством игольчатого подшипника 18 размещен на оси 19 в вилке 10. Ось 19 застопорена винтом 16, а с торцов защищена от попадания загрязнений крышками 20, закрепленными винтами 15. Вилка 10 своим хвостовиком установлена во втулке 13 и соединена посредством резьбы с упором 8, который своим пояском размещен во втулке 9. Между упором 8 и подвижным упором 6, находящимся на резьбе винта 1, размещена пружина 7. Винт 1 буртом упирается во втулку 4, размещенную в крышке 3, которая установлена в корпусе 11 и закреплена винтами 2. В корпусе 11 размещены также втулки 9, 13 и стопор 12, который своей концевой частью входит в паз хвостовика вилки 10 и предварительно фиксирует положение ее (равно как и ролика) в вертикальной плоскости. Требуемая сила сжатия пружины обеспечивается вращением винта 1 и контролируется с помощью установленного на подвижном упоре 6 ползуна 5 по шкале 22, закрепленной на корпусе 11

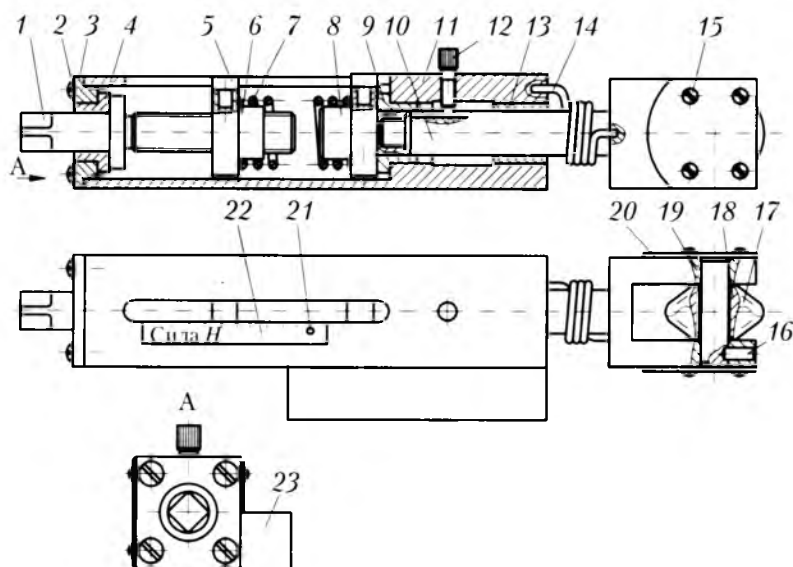


Рис. 2.53. Приспособление со сменными головками, оснащенными профильными роликами

винтами 21. Установка приспособления на станке осуществляется посредством державки 23.

Пружина 14 размещена на хвостовике вилки 10 и своими отогнутыми концами входит в отверстия корпуса 1 и вилки 10 и постоянно стремится за счет зазора между стопором и пазом повернуть вилку с роликом 17 относительно корпуса в сторону, обратную натяжению.

В процессе обработки обеспечивается контактирование ролика с обрабатываемой поверхностью в точке, смещенной вниз относительно оси обрабатываемой заготовки. При подаче ролика вдоль обрабатываемой поверхности он под действием небольших сил трения скольжения, преодолевая сопротивление пружины 13, поворачивается в сторону подачи и самоустанавливается в направлении обкатывания, обеспечивая обработку поверхности без скальзывания.

Виброраскатное устройство, ролики которого имеют наклонные витки (выпуклости), показано на рис. 2.54 [8]. Оно состоит из роликов 1, сепаратора, включающего упоры 2, их цапфы 3, половины с охватываемым 4 и охватывающим 5 поясками, штифты 6; раздвижного механизма, включающего пружину 7, оправку 8, конусные втулки 9 и гайку 10.

Ролики 1 с рабочим участком в виде витка Л с выпуклой поверхностью равномерно в круговом направлении установлены своими цилиндрическими хвостовиками в радиальные пазы Р упоров 2, которые посредством цапф 3 шарнирно соединены с половинами 4 и 5 сепаратора. Половины 4, 5 соединены между собой посредством центрирующих поясков с возможностью углового и осевого относительных перемещений за счет взаимодействия штифтов 6 половины 4 с окружными пазами К половины 5 сепаратора. От среднего положения 1 штифты 6 в окружных пазах могут занимать крайние положения II и III, что соответствует относительному повороту в одну или другую сторону в зависимости от направления подачи S , диаметра D обработки и направления вращения n устройства или заготовки в зависимости от осуществляемой на станке схемы.

Радиальное перемещение роликов 1 осуществляется с помощью пружины 7 и размещенными посредством шпонок III на оправке 8 конусными втулками 9, которые раздвигаются или сдвигаются

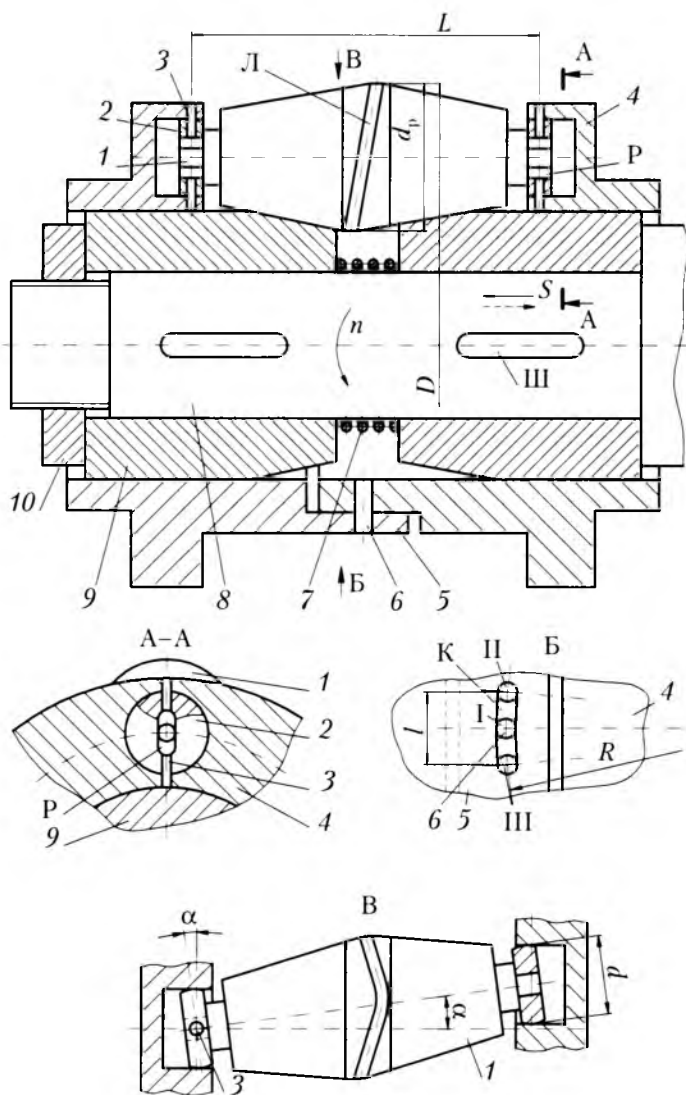


Рис. 2.54. Трехроликовое виброраскатное устройство, исключающее проскальзывание роликов

в осевом направлении при вращении гайки 10, расположенной на резьбе оправки 8.

Наладка и работа устройства осуществляются следующим образом. При заданных параметрах (S, D, n) режима обработки ролики 1 самоустанавливаются по угловому положению относительно оси устройства в направлении обработки и за счет фрикционного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью вынуждают половины 4, 5 сепаратора поворачиваться относительно одна другой в пределах перемещения штифтов 6 в окружных пазах. В этом случае упоры 2 на цапфах 3 также поворачиваются относительно фланцев половин сепаратора на угол α , обеспечивая полный контакт опорных торцовых поверхностей и хвостовиков роликов с рабочей торцовой поверхностью и пазами Р упоров.

Вместе с относительным поворотом половин 4, 5 сепаратора за счет криволинейности окружных пазов К радиусом $R = L$ сдвигаются или раздвигаются на величину $\Delta L = L(1 - \cos \alpha)$. В результате обеспечивается постоянство зазоров между опорными торцами роликов 1 и торцами упоров 2. За счет сферической боковой поверхности упоров диаметром d сохраняется постоянство зазоров между цилиндрической поверхностью осевых пазов половин сепаратора и повернутыми на угол α упорами, что повышает жесткость соединений ролики — упоры и упоры — половины сепаратора и исключает загрязнение соединений. В сечении А—А показано положение хвостовика ролика 1 в радиальном пазу упора 2 и цапф 3 в радиальных отверстиях половины 5 сепаратора.

Использование роликов с наклонной выпуклостью диаметром d_p позволяет при подаче S наносить на обрабатываемую поверхность следы в виде синусоид с длиной волн πd_p , наложенных на винтовые линии с углом наклона α . Применение устройства повышает надежность регуляризации микрогеометрии и качество рабочих поверхностей деталей за счет постоянства зазоров, повышения износостойкости соединений и роликов, что расширяет технологические возможности оснастки для ППД и снижает затраты на обработку. Ресурс работы устройства приведенной инструкции возрастает в 2,75 раза, затраты на обработку снижаются в среднем в 2,55 раза, а затраты на эксплуатацию и ремонт — в 4–5 раз.

2.3.6. Оснастка для комбинированной обработки

При совмещении различных методов и способов обработки в один процесс за счет применения комбинированных инструментов и приспособлений на их базе обеспечивается значительное повышение производительности обработки заготовок.

Комбинированный инструмент конструкции В.М. Сорокина и Е.А. Тарасовой для совмещенной обработки резанием и ППД (рис. 2.55) состоит из режущего блока, зачистного элемента и деформирующего блока. В качестве режущего блока в инструменте применена развертка 1, неподвижно закрепленная с помощью гайки 13 на оправке 2. Зачистным элементом является войлочный круг 4, установленный на втулке 5, которая напрессована и закреплена на оправке 2. Втулка 5 имеет буртик, к которому войлочный круг 4 поджимается сидящей на резьбе втулки гайкой 3. Деформирующий блок представляет собой жесткий раскатник, в состав которого входят опорный конус 8, сепаратор 9 и ролики 6, размещенные с возможностью планетарного вращения вокруг оси опорного конуса.

Значение диаметра раскатника регулируется в пределах $\pm 0,3$ мм путем перемещения сепаратора с роликами вдоль опорного конуса. Положение упорного подшипника 10, соответствующее заданному

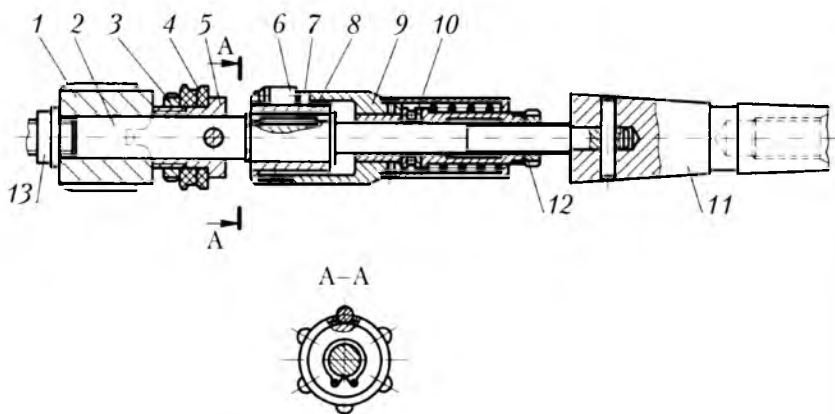


Рис. 2.55. Инструмент для совмещенной комбинированной обработки отверстий

диаметру, фиксируется гайкой 12. В конструкции предусмотрены разгрузочные ролики 7, установленные по торцу рабочих.

Применение различных режущих блоков (расточная пластина, резец, зенкер, развертка и т.п.) и регулируемых раскатников расширяет технологические возможности комбинированного инструмента. Обработка может вестись в широком диапазоне: снятие припусков в пределах 0,05...0,2 мм; отделочно-упрочняющая обработка ППД в режимах преимущественной отделки поверхностей или упрочнения подповерхностного слоя материала заготовок. Инструмент устанавливается хвостовиком 11 в конусное гнездо шпинделя станка, пиноли задней бабки или другого устройства и может работать в указанном режиме.

На рис. 2.56 представлен разработанный Е.Г. Коноваловым и А.И. Голибмиевским комбинированный инструмент для обработки сферических поверхностей резанием и ППД, работающий с самоподачей, которую осуществляют накатные ролики. Вилка 6 инструмента, которая установлена посредством подшипника скольжения 8 и упорного шарикоподшипника 7 в корпусе 9, в цилиндрических втулках 5 с прямоугольными пазами — посредством осей 3 смонтированы ролики 4. Перед роликами в диаметральной плоскости, проходящей через ось вращения инструмента, в соответствующих

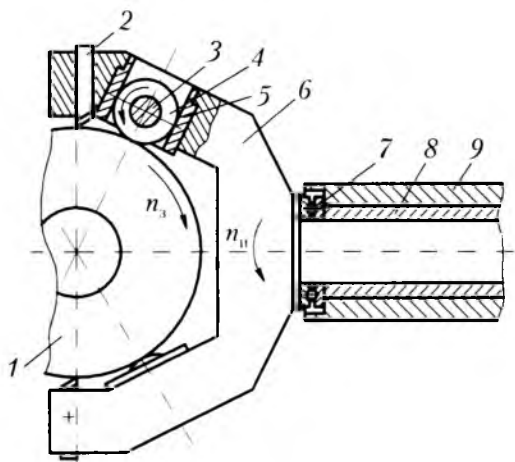


Рис. 2.56. Устройство для совмещенной комбинированной обработки сферических поверхностей

гнездах закреплены резцы 2. Корпус 9 устанавливается, например, в резцедержателе токарного станка.

Втулки 5 с роликами 4 могут поворачиваться вокруг своей оси, благодаря чему ролики по шкале, нанесенной на наружной поверхности вилки 6, могут устанавливаться на требуемый угол самоподдачи и фиксироваться винтами. Заготовка 1 в процессе обработки устанавливается в центрах станка и вращается с частотой n_3 . В связи с установкой роликов 4 под углом к плоскости вращения заготовки 1 вилка 6 получает вращательное движение с частотой n_{II} относительно оси своего хвостовика, обеспечивая круговую подачу при обработке резанием и ППД сферической поверхности заготовки.

Комбинированные инструменты для обработки внутренних и наружных цилиндрических поверхностей показаны на рис. 2.57 и 2.58 [6]. Инструмент (рис. 2.57) состоит из направляющего элемента 1, деформирующих элементов 2, 3 для создания ПРМР, деформирующих элементов 4, 5 для создания ЧРМР, режущего 6 и калибрующего 7 элементов, державки 8, упорных колец 9, подшипников 10 и фиксаторов 11. Из таких же элементов состоит полнокомплектный комбинированный инструмент для регуляризации микрогеометрии наружных цилиндрических поверхностей (ПРМР + ЧРМР).

Поскольку инструменты для достижения поставленных задач могут содержать не весь комплект элементов, то для примера на рис. 2.58, а показан инструмент для образования лишь ЧРМР, у которого отсутствуют элементы 2, 3 для образования ПРМР. Инструмент работает следующим образом. На обрабатываемую поверхность заготовки диаметром D_3 (рис. 2.57, 2.58, а) в направлении рабочего хода v_p под действием силы P после направляющего элемента III надвигаются деформирующие элементы (секции зубьев) 2 и 3, за ними — деформирующие элементы 4 и 5, режущие 6 и калибрующие 7 элементы. Деформирующие элементы размещены на державках 8 цилиндрическими поверхностями диаметрами D с возможностью вращения. Первая секция, входящая в заготовку с абсолютным натягом i_a , вращается в направлении n_1 , вторая секция, входящая с натягом $1,5i_a$, вращается в направлении n_2 . Самовращение деформирующих элементов обеспечивается за счет винтового расположения под углом γ выпуклостей А в коли-

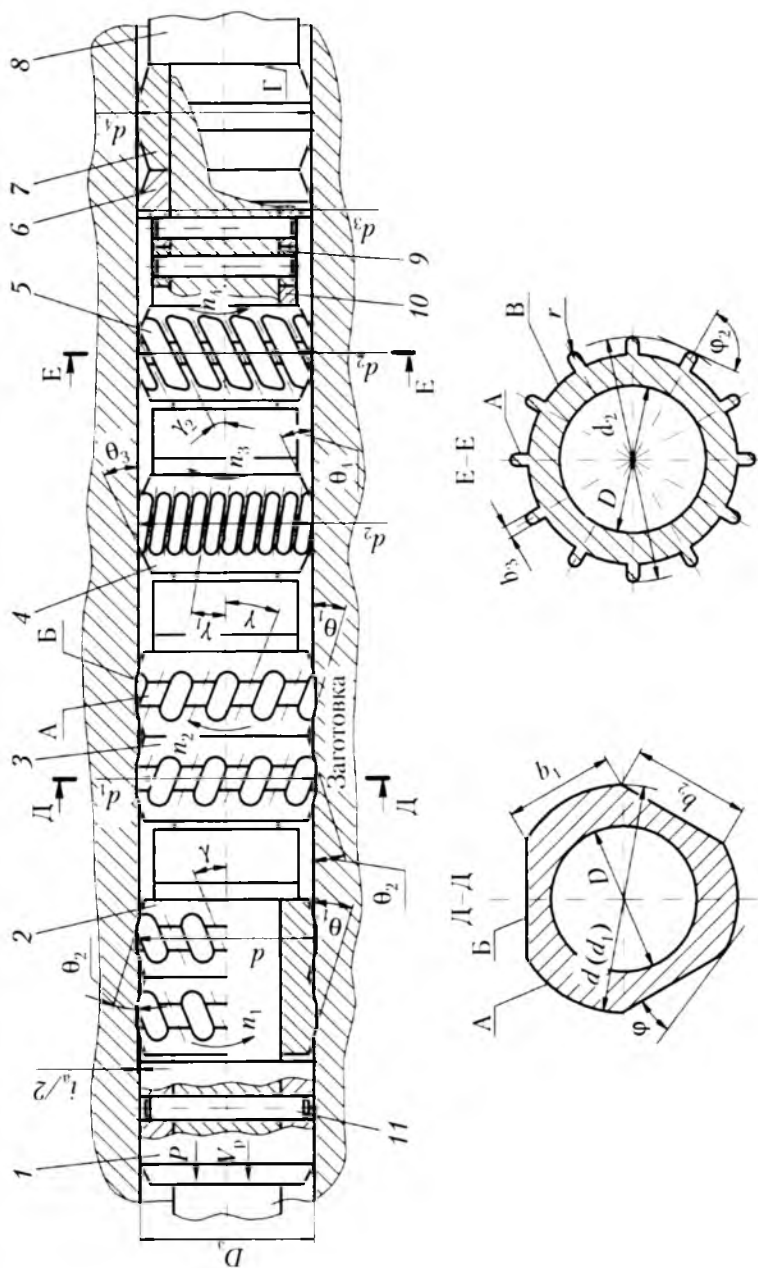


Рис. 2.57. Комбинированный инструмент для регуляризации микро рельефов внутренних цилиндрических поверхностей

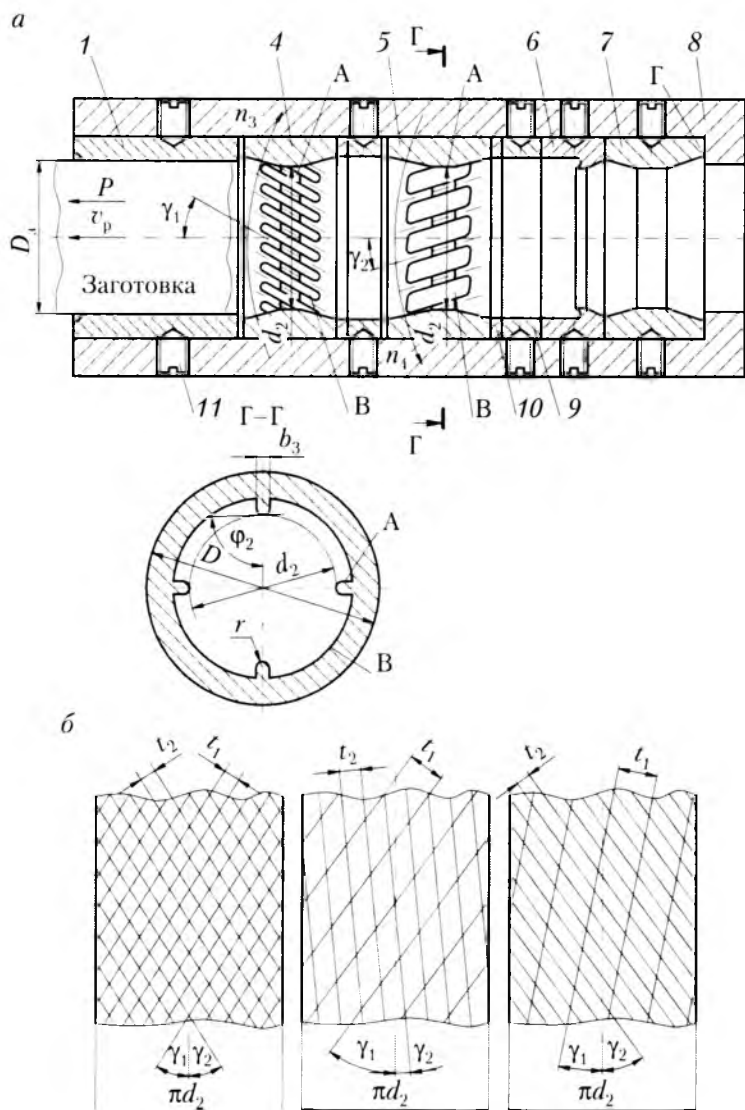


Рис. 2.58. Комбинированный инструмент для обработки ППД резанием наружных цилиндрических поверхностей (а) и разновидности ЧЗРМР на развертках цилиндров (б)

честве z_1 , ограниченных в радиальном направлении цилиндром диаметром d , в круговом — винтовой лыской или боковыми поверхностями впадин Б с расположением под углом $\varphi \leq 30^\circ$ относительно касательной к цилиндру в месте перехода его в лыску (боковую поверхность разделительной впадины), в осевом — заборным и обратным конусами с углами θ_1 и θ_2 . При работе деформирующие элементы 2–5 удерживаются от осевого перемещения упорными кольцами 9 через подшипники 10. Закрепление упорных колец 9 на державке 8 обеспечивается с помощью фиксаторов (штифтов или винтов) 11.

В результате превышения ширины b_1 выпуклостей А над шириной b_2 лысок или впадин Б, шахматного расположения выпуклостей А, расположения лысок и боковых поверхностей впадин под углом φ относительно касательной к цилиндрическим поверхностям диаметрами d , d_1 и вращения секций в разные стороны обеспечивается образование регулярных по высоте и форме микронеровностей поверхностей. За счет воздействия на поверхность под углом не менее 60° и исключения выдавливания материала из-под выпуклостей в круговых направлениях достигается высокое качество обработанных поверхностей по микрогеометрии и геометрической форме.

Деформирующие элементы 4 и 5 (рис. 2.57, 2.58, а) выполнены в виде зубьев с выпуклостями А шириной b_3 в количестве z_2 , ограниченными расположенной на цилиндре диаметром d_2 цилиндрической поверхностью с радиусом скругления r , стенками пазов В, заборным и обратным конусами с углами θ_3 и θ_4 . Выпуклости элементов 4 и 5 также имеют противоположные винтовые направления под углами γ_1 , γ_2 и при перемещении инструмента в направлении v_p заставляют зубья вращаться в направлениях n_3 и n_4 . При этом за счет натяга $(3...6)i_a$ на обрабатываемых поверхностях образуется ЧРМР в виде системы канавок с одинаковыми (γ_1) или разными (γ_1 и γ_2) углами наклона регулярных неровностей относительно оси цилиндрической поверхности (рис. 2.58, б).

При последующем движении инструментов вдоль цилиндрических поверхностей в работу вступают режущие 6 (рис. 2.57, 2.58, а) диаметром d_3 и калибрующий 7 диаметром d_4 с заборным и обратным конусами под углом θ_5 элементы. При этом приканавочные наплывы материала, возникшие при образовании ЧРМР, срезаются,

а места их расположения выглаживаются и обрабатываемая цилиндрическая поверхность калибруется окончательно.

Достижение эффективной совмещенной в один процесс комбинированной обработки (вибровыглаживание с образованием ПРМР, вибровыглаживание с образованием ЧРМР, срезание приканавочных наплывов выдавленного материала, калибрование), двойной регуляризации микрорельефов, повышенных качества поверхностей и производительности обработки наилучшим образом обеспечивается при следующих значениях и соотношениях параметров инструмента:

$$d = d_4 = D_3 \pm i_a; \quad d_1 = D_3 \pm 1,5i_a; \quad d_2 = D_3(3...6)i_a;$$

$$d_3 = D_3 \pm 2K(Rz_{исх} - R);$$

$$z_1 = d/1,8 \lg d; \quad z_2 = \frac{\pi d_2}{\frac{t_{1,2}}{\cos \gamma_{1,2}}};$$

$$\theta_1 = 4...5^\circ; \quad \theta_2 = \theta_4 = 2...3^\circ; \quad \theta_3 = 3...4^\circ; \quad \theta_5 = 1...2^\circ;$$

$$\gamma \leq 27^\circ; \quad \gamma_{1,2} \leq 40^\circ; \quad b_1 = 1,05d \sin \frac{90}{z_1};$$

$$b_2 = \frac{\pi d - b_1 z_1}{z_2}; \quad b_3 = 2r; \quad b_4 = \frac{\pi d - b_3 z_2}{z_2};$$

$$b_1/b_2 = 1,11; \quad b_3/b_4 \leq 0,5; \quad \varphi \leq 30^\circ; \quad \varphi_1 = 70...87^\circ,$$

где D_3 — диаметр заготовки перед обработкой, мм; i_a — абсолютный натяг, мм («+» — при инструменте для обработки внутренних поверхностей, «-» — при инструменте для обработки наружных цилиндрических поверхностей); $Rz_{исх}$, R — высоты микронеровностей и регулярных элементов соответственно исходной и обработанной поверхностей (ПРМР), мм; $t_{1,2}$ — шаги расположения регулярных элементов в виде канавок (ЧРМР), мм:

$$t_{1,2} = \sqrt{(b_3 - b_4)^2 [1 + 0,75 \operatorname{tg}(360/z_2)]};$$

$\gamma_{1,2}$ — углы расположения винтовых выпуклостей инструмента и регулярных элементов поверхности (направления следов обработки), град.; r — радиус округления выпуклостей элементов для образования ЧРМР, мм; K — коэффициент, зависящий от свойств материала заготовки, $K \approx 1,33$.

Описанный инструмент может работать в режиме протягивания или проталкивания заготовок с цилиндрической наружной поверхностью, протягивания или дорнования-прошивания отверстий заготовок. В целях переналаживания инструмента отключаются фиксаторы 11, снимаются направляющие, деформирующие и другие элементы и устанавливаются с последующим закреплением элементы других диаметров и другого сочетания. На рис. 2.58, а, например, показан вариант инструмента для обработки наружных цилиндрических поверхностей, в котором установлен неполный комплект элементов. Из-за отсутствия деформирующих элементов для образования ПРМР указанным инструментом можно обеспечить лишь образование ЧРМР, и тогда диаметры режущих и калибрующих элементов можно принимать $d_3 = d_4 = D_3$.

Применение описанных инструментов позволяет без дополнительных источников вибрации (виброголовок) за один проход одновременно образовывать на цилиндрических поверхностях ПРМР и ЧРМР и за счет этого увеличивать как несущую способность, так и маслостойкость рабочих поверхностей деталей. В результате совмещения образования ПРМР и ЧРМР, срезания приканавочных наплывов материала и калибрования поверхностей в один процесс в несколько раз возрастает производительность комбинированной обработки и исключаются ПН.

2.3.7. Автоматизированное оборудование для обработки ППД

Отсутствие серийно выпускаемого оборудования для ППД и вибрационной обработки приводит к необходимости создания установок на базе универсального металлорежущего оборудования, специальных станков-автоматов и полуавтоматов. Ниже описан опыт создания и применения такого оборудования.

Виброустановка ВУ-1 (рис. 2.59, табл. 2.9) [7] создана путем модернизации токарного станка мод. КТС-250. Она предназначена для вибросверления, растачивания и вибораскатывания внутренних и виброобкатывания наружных цилиндрических поверхностей заготовок — тел вращения. Виброустановка оборудована виброголовкой механогидравлического действия, установленной вместо резцедержателя на поперечной каретке станка. Возбуждение вибрации осуществляется от шпинделя установки через приводной

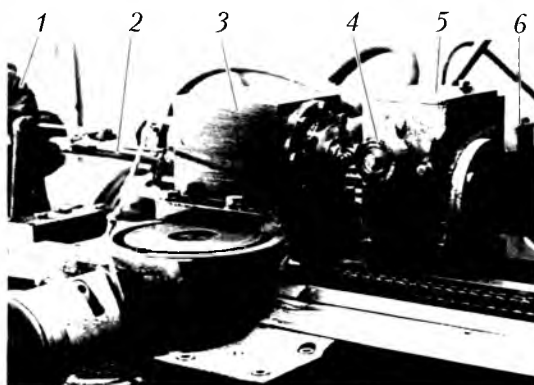


Рис. 2.59. Виброустановка ВУ-1 на базе модернизированного токарного станка КТС-250:

1 — трехкулачковый патрон; 2 — вал отбора вращения; 3 — виброголовка; 4 — кулачок возбуждения вибрации; 5 — винтовой мультипликатор; 6 — насосная станция подачи СОЖ

вал, червячный редуктор и кулачок. Установка оснащена насосными станциями для обеспечения работы виброголовки и подачи СОЖ. Изменение частот вращения шпинделя и вибрации осуществляется вариатором бесступенчато. Соотношение частот вращения шпинделя и вибрации инструмента обеспечивается при настройке на обработку гитарой сменных колес. Работа установки осуществляется в полуавтоматическом режиме.

Таблица 2.9

Технические характеристики установки ВУ-1

Параметр	Значение
Частота вращения шпинделя (бесступенчатое регулирование), мин^{-1} :	
без перебора	155...558
с перебором	1000...3600
Подача инструмента, мм/об	0,005...3,0
Частота вибрации инструмента, Гц	20...200
Амплитуда колебаний инструмента, мм	0,005...0,5
Давление жидкости, МПа:	
в системе виброголовки	4,0
в системе подачи СОЖ	До 12,5

Более широкие возможности обеспечивает разработанная с участием студента Н.И. Новохацкого виброустановка ВУ-2, кинематическая схема которой представлена на рис. 2.60, а технические характеристики — в табл. 2.10. Установка создана на базе токарно-винторезного станка мод. 1Е61МТ. Станок оснащен регулируемой по амплитуде колебаний виброголовкой электромеханического действия (установлена на суппорте станка) и виброголовкой механогидравлического действия (установлена на направляющих станины вместо задней бабки). Установка позволяет осуществлять точение и виброточение, сверление и вибросверление, накатывание и вибронакатывание шарами, выглаживание и вибровыглаживание алмазными наконечниками. Она дополнительно оборудована устройствами для быстрого отвода инструмента, двумя насосными станциями, электронными устройствами с датчиками для автоматизации управления обработкой. Кроме того, в установке по сравнению с базовым станком увеличены частоты вращения шпинделя и расширен диапазон изменения подач. Полуавтоматический режим работы виброустановки ВУ-2, обеспечивается наличием концевых упоров, отключающе-переключающих устройств, электронного устройства управления станком.

Таблица 2.10

Технические характеристики установки ВУ-2

Параметр	Значение
Частота вращения шпинделя, мин^{-1}	90...4000
Подача инструмента, мм/об	0,008...6,0
Частота вибрации инструмента, Гц:	
установленного в виброголовке электромеханического действия	27,3
установленного в виброголовке механогидравлического действия (бесступенчатое регулирование)	22...110
Амплитуда колебаний инструмента, мм:	
установленного в виброголовке электромеханического действия (бесступенчатое регулирование)	0,28...5,70
установленного в виброголовке механогидравлического действия	0,08...1,0
Давление жидкости, МПа:	
в системе виброголовки механогидравлического действия	4,0
в системе подачи СОЖ	До 12,5

Виброустановка ВУ-6 (рис. 2.61, табл. 2.11) [6, 9] создана путем модернизации и дооснащения вертикально-сверлильного станка 2Н135 и может служить примером создания виброустановок на базе вертикально-фрезерных, расточных, многшпиндельных токарных полуавтоматов и других металлорежущих станков с вертикальным расположением шпинделей. Виброустановка работает по схеме: шпиндель вращается и вибрирует, заготовка не вращается и подается. Установка предназначена для обработки вибрационными резанием и ППД.

Таблица 2.11

Техническая характеристика установки ВУ-6

Параметр	Значение
Частота вращения шпинделя, мин^{-1}	611...5100
Подача инструмента, мм/об	100
Частота вибрации инструмента, Гц	14...117
Амплитуда колебаний инструмента, мм	0.015...5
Давление жидкости в системе СОЖ, МПа	2.5

Вращательное движение виброшпинделю 6 с патроном 5 сообщается от электродвигателя 26. В качестве редуктора использован вариатор, состоящий из клинового ремня 19 и двух раздвижных шкивов 20. С целью обеспечения вибрации шпиндель выполнен из двух частей — вала 18 и виброшпинделя 6, которые соединены между собой с помощью датчиковой муфты. Верхняя полумуфта 17 вместе с радиальным шарикоподшипником 11 расположена на валу 18. Нижняя полумуфта 12 с пальцами 16, входящими в пазы полумуфты 17 и опирающимися в ее подпружиненные упоры 30, расположена на шарикоподшипнике 11 и соединена посредством шлиц с виброшпинделем 6. С помощью пальцев 16 и шлицевого соединения вращение от вала 18 передается на виброшпиндель 6.

Движение подачи осуществляется от установленного в станине 34 электродвигателя 35 через муфту 36, червячную пару 2 и винт 1 столом 4, на котором устанавливается обрабатываемая заготовка.

Виброшпиндель 6 размещен в радиальных шарикоподшипниках 7, 11 и находится под воздействием пружины 9, упирающейся одним концом в упорный шарикоподшипник 8, а другим — в бурт

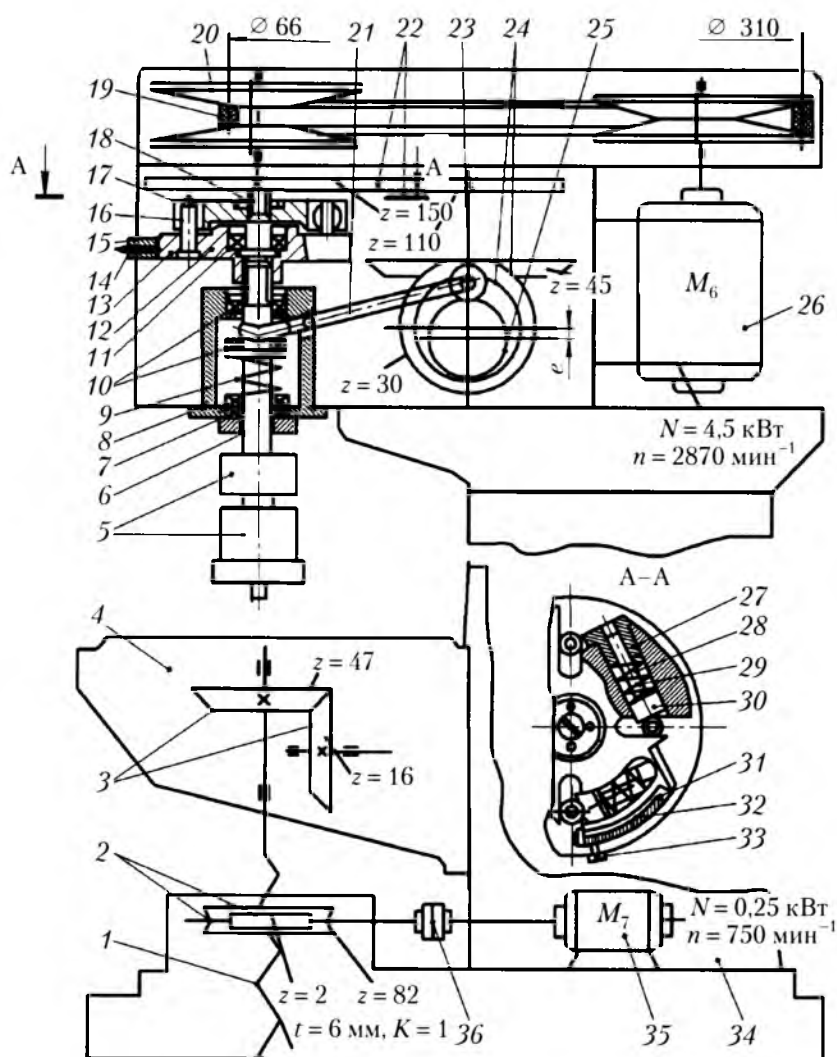


Рис. 2.61. Схема виброустановки ВУ-6 на базе вертикально-сверлильного станка мод. 2А135

виброшпинделя 6. Вращение с вала 18 снимается посредством сменной цилиндрической 22 и конической 24 зубчатых пар и передается на кулачок 25 с эксцентриситетом e . Вилчатый рычаг 21 установлен на оси. Он одним концом посредством ролика 23 контактирует с кулачком 25, другим — через упорный шарикоподшипник 10 воздействует на виброшпиндель 6. При вращении кулачка 25 рычаг 21 во взаимодействии с пружиной 9 обеспечивает осевую вибрацию виброшпинделя 6. При одном приводе вращения и вибрации виброшпинделя обеспечивается постоянное отношение частот вращения и вибрации инструмента, который устанавливается в патрон 5 механогидравлического действия.

Установка снабжена насосной станцией для подачи СОЖ под большим давлением через внутренние каналы инструмента при вибрационном сверлении, зенкеровании и развертывании отверстий в заготовках из вязкопластичных материалов и датчиковой муфтой реостатного действия, которая работает следующим образом.

На нижней полумуфте 12 предусмотрено токосъемное кольцо 15, изолированное от полумуфты текстолитовым кольцом 13. С кольцом 15 постоянно контактирует изолированный от массы и установленный на корпусе шпиндельной бабки подпружиненный контакт 14, а на самом кольце — контакт 33. При передаче момента пальцы 16 перемещают поджимные упоры 30 в направлениях перемещения штоков 28 и сжимают пружины 29, опирающиеся на опоры 27. При этом полумуфта 17 поворачивается пропорционально моменту обработки относительно полумуфты 12, а контакт 33 перемещается по сопротивлению 32, изолированному от полумуфты 17 изоляцией 31, включая в цепь измерения различное число витков сопротивления. Один конец сопротивления соединен с массой установки, другой через контакт 33, кольцо 15 и контакт 14 выведен на клемму электронного управляющего устройства. Тарировка устройства осуществляется так, что при затуплении режущего инструмента или чрезмерно больших силах поджима шаров (алмазных наконечников) к обрабатываемой поверхности при виброобкатывании (вибровыглаживании) внутренних цилиндрических поверхностей заготовок оно отключает электродвигатель 26 (равно как и электродвигатель насосной станции в случае обработки виброрезанием) и переключает на обратное вра-

шение реверсивный электродвигатель 35, обеспечивая остановку вращения и вибрации инструмента и обратное направлению подачи перемещение стола с заготовкой (вниз).

Для ультразвуковой обработки ППД созданы установки на базе токарно-винторезных (мод. 1А616), поперечно-строгальных (мод. 7Е35) и других станков [4, 6]. На рис. 2.62, *а* показана рабочая зона виброустановки на базе поперечно-строгального станка мод. 7Е35 (технические характеристики см. в табл. 2.12). Акустический узел (виброголовка) 1 устанавливается на суппорте ползуна станка. Он обеспечивает в перпендикулярном направлении к плоской обрабатываемой поверхности заготовки 2 силу P поджима и вибрацию инструмента 3 с ультразвуковой частотой f_{vy} . Главное возвратно-поступательное движение инструмента со скоростью v , подача S и подача СОЖ обеспечиваются системами станка. Установка оборудована ультразвуковым генератором мод. УЗГ5-1,6/22 и системой автоматического поддержания резонанса и амплитуды ультразвуковых колебаний (САПРА).

Для ультразвуковой обработки фасонных поверхностей в виде желобов наружного (криволинейный концентратор) и внутреннего (прямолинейный концентратор) колец шарикоподшипников из сталей типа ШХ15СГ используются автоматизированные установки, созданные на базе модернизации желобошлифовальных

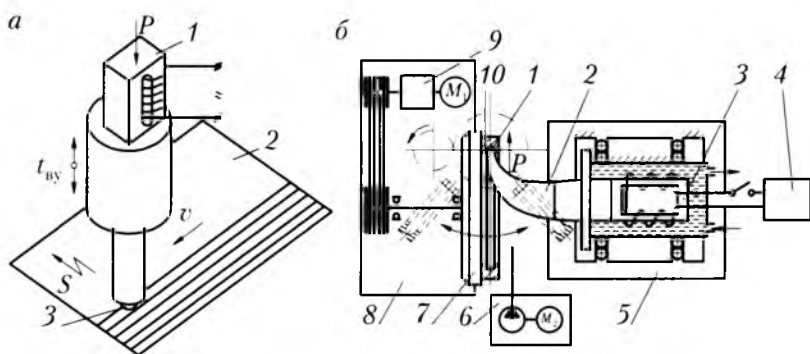


Рис. 2.62. Рабочая зона установки для ультразвукового ППД на базе поперечно-строгального станка мод. 7Е35 (*а*) и схема установки для ультразвукового выравнивания желоба наружных колец шарикоподшипников на базе желобошлифовального станка ЛЗ-29П (*б*)

станков мод. ЛЗ-29П и ЛЗ-30П. Схема установки на базе станка ЛЗ-29П представлена на рис. 2.62, б, ее технические характеристики — в табл. 2.13 [6, 8].

Таблица 2.12

**Технические характеристики ультразвуковой установки
на базе станка мод. 7Е35**

Параметр	Значение
Наибольшая длина хода инструмента, мм	500
Наибольшие перемещения стола, мм:	
горизонтальное	530
вертикальное	310
Скорость перемещения инструмента обеспечивается возвратно-поступательным движением ползуна с частотой, дв.х./мин	13,2...150
Поперечная подача S , мм/дв.х.	0,1...4,0
Частота вибрации инструмента, кГц	22
Амплитуда колебаний инструмента, мкм	0,5...50

Ультразвуковое выравнивание осуществляется твердосплавным рабочим элементом 1, размещенным в криволинейном концентраторе 2, который установлен на магнитоотрицательном преобразователе 3, функционирующем от ультразвукового генератора. Для обеспечения обработки ППД в установке предусмотрены суппорт 5, насосная станция 6 для подачи СОЖ, электромагнитный патрон 7 для крепления обрабатываемой заготовки 10, шпиндельная бабка 8 и редуктор 9 привода шпинделя. Рациональные параметры режима ультразвуковой обработки ППД желобов наружных колец, например, шарикоподшипника № 226 (радиус желоба $14,72^{+0,013}_{-0,001}$): сила статического поджима инструмента $P = 250$ Н, радиус сферы инструмента $r_c = 3,5$ мм (материал рабочей части — твердый сплав ВК8), амплитуда вибрации $2A = 30$ мкм, подача $S = 0,18$ мм/об, скорость выравнивания $v = 50$ м/мин, СОЖ — масло индустриальное И-40А. Цикл обработки в автоматическом режиме — 2 мин.

Электронные управляющие устройства виброустановок ВУ-1, ВУ-2, ВУ-6 и ультразвуковой установки на базе станка 7Е35 позволяют не допускать поломки режущего инструмента, исключить обработку ППД с завышенными силами поджима инструмента к обрабатываемой поверхности, что может привести к ухудшению

качества поверхности, явлению перенаклепа и даже отслаиванию подповерхностного слоя материала деталей или покрытия, получить стабильные результаты точности обработки, повысить КПД оборудования.

Таблица 2.13

**Технические характеристики ультразвуковой установки
на базе станка мод. ЛЗ-29П**

Параметр	Значение
Частота качания бабки с заготовкой, дв.х/мин	0,03...1,19
Ультразвуковой генератор, тип	УЗГ-1-4
Мощность УЗГ, кВт:	
выходная	4,5
потребляемая	7,5
Частота вибрации $f_{\text{вч}}$, кГц	17,5...19,3 и 20,5...23,5
Напряжение, В:	
выходное	360
питающее (сетевое)	380
Тип магнитострикционного преобразователя тип	ПМС-12А-18

Эффективность применения ППД в автоматизированном производстве очевидна. Так, на Кизлярском электромеханическом заводе в результате применения ультразвуковой установки на базе поперечно-строгального станка 7Е35 и технологии ультразвуковой обработки ППД экономия инструментальных материалов на одну установку составила 240 тыс. дол. США. При этом исключено ручное «грязное» полирование отражателей электрокаминов и использование на эту обработку кожи, фетра, полировочных паст, улучшены условия труда рабочих, качество рабочей поверхности отражателей и внешний вид каминов.

2.3.8. Комбинированная обработка резанием и ППД

Анализ производственного опыта и результатов исследований показывает, что при отделке деталей из вязкопластичных материалов следует избегать обработку резанием, связанную со снятием малых слоев металла толщиной, близкой по значению к радиусу скругления режущих кромок инструмента, с применением абразив-

ных инструментов и материалов, электролитов и других загрязняющих компонентов. Отделочную абразивную обработку следует применять лишь для обработки материалов с высокой твердостью.

Обычное точение и фрезерование как процессы, хорошо управляемые по геометрии резания, можно рекомендовать для получистовой обработки поверхностей деталей из вязкопластичных материалов. Эти способы обработки осуществляются с достаточно большой глубиной резания и при точном оборудовании, рациональных параметрах процесса и применении эффективных СОЖ обеспечивают поверхности требуемой точности с микрогеометрией, характеризуемой $Ra = 0,8...1,6$ мкм и отсутствием ПН. Вибрационное точение и фрезерование применять нежелательно из-за неравномерной шероховатости обрабатываемых поверхностей.

Вибрационное сверление можно использовать для обработки отверстий малого диаметра и большой длины с обеспечением точности качества 7 и микрогеометрии поверхности с $Ra \geq 0,4$ мкм. Если требуется микрогеометрия поверхности с $Ra < 0,4$ мкм, то рекомендуется комбинированная обработка отверстий вибросверлением с последующим дорнованием сульфидированными дорнами, которое может повышать точность отверстий и снижать величину Ra с исходной 0,4 мкм до 0,1 мкм [4, 6].

В качестве режущего инструмента для комбинированной обработки отверстий применяются вибросверла (рис. 2.63), содержащие корпус из сталей 20, 20Х и пластину из твердого сплава (ВК6М, ВК8М и др.) и имеющие отверстие для внутреннего подвода СОЖ. Корпус подвергается сквозной цементации и закалке до твердости 51...56 HRC, пластина припаивается к корпусу припоем типа ПрАНМЦ0,6-4-2, имеющим температуру плавления (1423 К) выше температуры термообработки корпуса, что исключает подплавление припоя и ослабление крепления пластины при химико-термической обработке корпуса. В качестве инструмента для ППД используют дорны.

Критерием оценки микрогеометрии приняты параметры Ra и Rz шероховатости поверхности. Рис. 2.64 иллюстрирует влияние инструмента и условий обработки на величину Ra поверхностей титанового ВТЗ-1, никелевого — ХН67ВМТЮ сплавов и стали 12Х18Н10Т. Зависимости получены при основных характеристиках инструмента: диаметр вибросверл и дорнов — 5 мм, угол

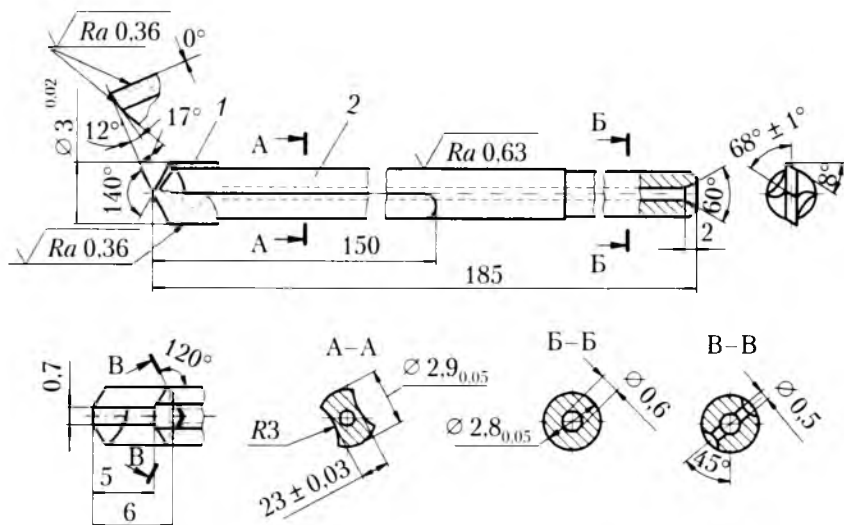


Рис. 2.63. Вибросверло с каналом для внутреннего подвода СОЖ:
1 — твердосплавная пластина; 2 — корпус

при вершине вибросверл — 140° , углы заборного и обратного конусов дорнов $\theta_1 = 5^\circ$, $\theta_2 = 4^\circ$. Параметры режима сверления и вибросверления: $n_3 = 1200 \text{ мин}^{-1}$ ($v = 18,8 \text{ м/мин}$); $S = 0,008 \text{ мм/об}$; $f_v = 75 \text{ Гц}$; $i = 15/8$; $2A = 0,05 \text{ мм}$; СОЖ — раствор состава «Аквол-10». Измерение величины Ra производилось на профилографе-профилеометре мод. 253.

Дальнейшие исследования показали, что поверхности отверстий труднообрабатываемых материалов, просверленных вибросверлами без вибрации инструмента, обладают ПН и соответствуют разновидности 5 (см. табл. 2.6). При амплитуде вибрации $2A < 0,5S$ обеспечивается поверхность разновидности 4; при $0,5S \leq 2A < S$ — поверхность разновидности 3; при $2A = S$ — поверхность разновидности 2; при $S < 2A < 1,5S$ — поверхность разновидности 1. Поверхности разновидности 0 надежно обеспечиваются при комбинированной обработке вибросверлением с последующим дорнованием стальными хромированными дорнами с сульфидированием.

Исследование точности отверстий ($d = 5 \text{ мм}$, $l = 54 \text{ мм}$) осуществлялось на заготовках трубок из меди М1НТ. Параметры режима вибросверления: $S = 0,035 \text{ мм/об}$; $n_3 = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ($v = 31,4 \text{ м/мин}$);

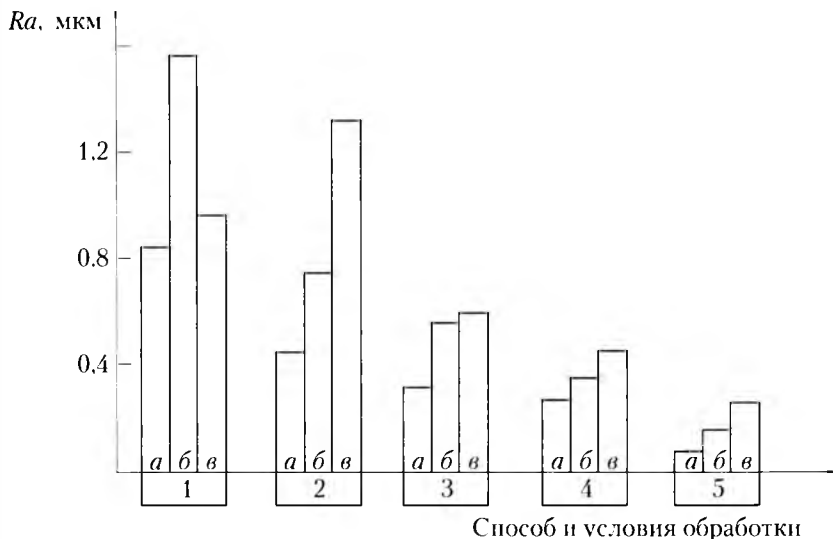


Рис. 2.64. Влияние способа и условий обработки на микрогеометрию поверхности отверстий:

а — сплав ВТ3-1; *б* — сплав ХН67ВМТЮ; *в* — сталь 45; 1 — сверление спиральным сверлом из стали Р6М5, СОЖ — поливом; 2 — сверление спиральным сверлом из твердого сплава ВК8, СОЖ — поливом; 3 — сверление специальным сверлом, армированным твердым сплавом ВК8, СОЖ — под давлением; 4 — вибрационное сверление специальным сверлом, СОЖ — под давлением; 5 — дорнование хромированным дорном с сульфидированием, СОЖ — нанесение кисточкой

$f_b = 75$ Гц; $2A = 0,08$ мм; $i = 9/8$ ($i_0 = 1/8$). После сверления отверстие контролировалось с помощью пневмокалибра на пневмодлиномере низкого давления (0,5 МПа). Из 50 заготовок 48 не вышли по значению диаметра отверстия за допуск T (по чертежу диаметр 5Н7, $T = 12$ мкм). Отклонение от круглости дополнительно проверялось на кругломере мод. 218.

Как следует из рис. 2.65, a , максимальное отклонение от круглости при вибросверлении $\Delta = 8$ мкм. Отклонение от цилиндричности проверялось по конусности отверстия путем измерения диаметра на входе, в середине отверстия и на выходе сверла. Эти отклонения составили от 6 до 10 мкм и не вышли за пределы допуска на диаметр. Описанное сверление производилось при радиальном зазоре между сверлом и кондукторной втулкой, равном 0,04 мм. С уменьшением

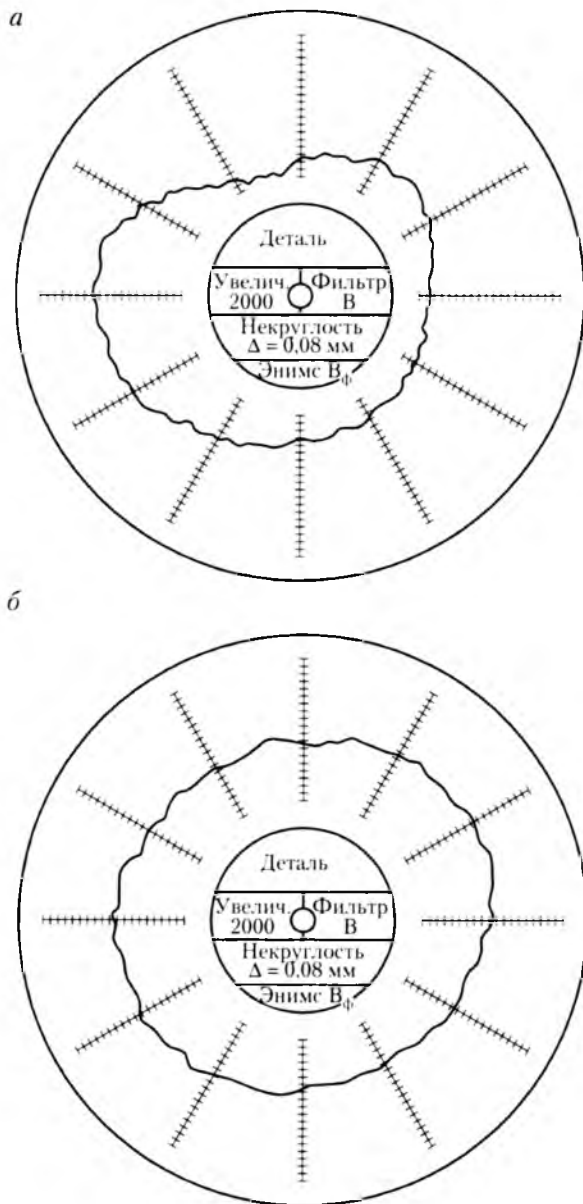


Рис. 2.65. Круглограммы отверстий втулок:
a — после вибросверления; *б* — после дорнования ($\times 2000$)

зазора до 0,02 мм поля рассеяния отклонений размеров и формы отверстий снижаются в 1,7 раза.

Увод оси отверстия исследовался на образцах из высокопластичного алюминиевого сплава АД1. При этом выявлялась зависимость увода оси отверстия от схемы сверления (вращение и подача сверла; вращение заготовки, подача сверла), длины отверстия и конструкции сверла (удлиненные спиральные, специальные с внутренним подводом СОЖ — 5 % эмульсии из эмульсола ЭТ-2, диаметр сверла 5 мм).

После сверления образцы устанавливались в центрах и по биению наружной цилиндрической поверхности на них определялась плоскость, в которой ось продольного сечения отверстия имеет наибольший увод. Эта плоскость отмечалась на наружной поверхности образцов продольной риской. С целью исследования зависимости приращения биения отверстия от глубины сверления образцы ($l = 100$ мм) разрезались на десять секций длиной 9,5 мм, которые нумеровались. После этого у каждой секции измерялось биение наружной цилиндрической поверхности относительно отверстия по схеме (рис. 2.66, *а*). Результаты исследования (рис. 2.66, *б*) показали, что наименьший увод оси отверстия наблюдается при схеме, когда вращается заготовка, а сверло не вращается и подается. Применение вибросверл даже в обычных условиях сверления примерно в 8 раз снижает увод оси отверстия.

Наиболее рельефно проявляются положительные стороны схемы, когда вращается заготовка, а подается сверло, при вибрационном сверлении с использованием прецезионных механогидравлических патронов [8, 9] и устройства для сверления (А.с. 844157). Так, при сверлении спиральным сверлом и вибросверлении вибросверлом отверстия диаметром 3 мм и длиной 36 мм в заготовках из титанового сплава ВТЗ-1 при различных схемах обеспечиваются разные значения увода оси отверстия (табл. 2.14). Таким образом, вибросверлением на высокоточных установках (ВУ-2 и др.) можно обеспечить увод оси отверстий, не превышающий для заданных условий 0,015 мм.

Отклонение от круглости отверстий после дорнования снижается с 8 до 4 мкм, или в 2 раза (см. рис. 2.65, *а*, *б*). Отклонение от цилиндричности — конусность отверстий 10 заготовок из меди М1НТ ($d = 5$ мм), обработанных после вибросверления дорнованием,

снижается в среднем с 8,9 до 7,2 мкм, или на 19 %. Увод оси отверстий при дорновании практически не изменяется, хотя имеет тенденцию к незначительному уменьшению. Шероховатость поверхности отверстий в заготовках из титанового и никелевого сплавов и стали 12Х18Н10Т при дорновании сульфидированными дорнами снижается с 0,3...0,5 мкм до 0,1...0,2 мкм, или в 2,5 раза (см. рис. 2.64).

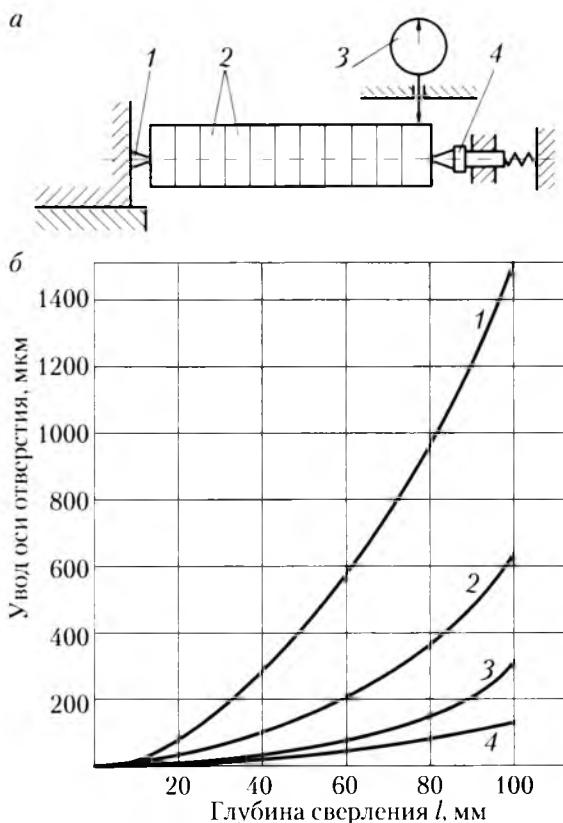


Рис. 2.66. Измерение биения отверстия:

a — схема замера (1, 4 — центры; 2 — секции образца; 3 — индикатор); *б* — зависимость увода оси отверстия от глубины сверления (1 — спиральным сверлом с вращением сверла; 2 — то же с вращением заготовки; 3 — вибросверлом с вращением сверла; 4 — увод оси при его дорновании после вибросверления. Во всех случаях — подача сверла)

Таблица 2.14

Показатели увода оси отверстий при сверлении

Схема сверления, инструмент (оборудование)	Биение отверстия, мм		Приращение биения на выходе сверла, мм	Увод (искривление) оси от отверстия, мм
	на входе сверла	на выходе сверла		
Сверло вращается, заготовка не вращается; спиральное сверло из стали Р6М3 (станок мод. 2А125)	0.13	0.47	0.34	0.17
Сверло не вращается, заготовка вращается; спиральное сверло из стали Р6М3 (станок мод. 1К62)	0.12	0.36	0.24	0.12
Сверло не вращается, но вибрирует; заготовка вращается; вибросверло с пластиной твердого сплава ВК8 (виброустановка мод. ВУ-1)	0.10	0.12	0.02	0.01

Шероховатость поверхности отверстий в значительной степени зависит от параметров дорнов и, в частности, от их углов конусов. Из рис. 2.67 следует, что для обеспечения наименьшего значения R_z шероховатости поверхности необходимо принимать значения углов заборного и обратного конусов соответственно $\theta_1 = 4...6^\circ$ и $\theta_2 = 2...6^\circ$.

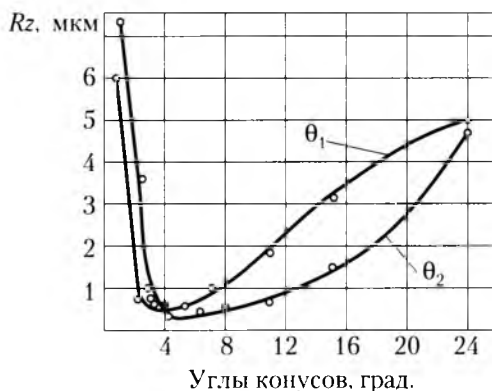


Рис. 2.67. Зависимость высоты неровностей R_z поверхности отверстий от углов конусов дорнов

Комбинированная обработка приводит к изменению микроstructures (M_c), микротвердости H_μ , степени упрочнения (C_y) и толщины h_σ упрочненного подповерхностного слоя материала деталей. Из рассмотрения микроstructures (рис. 2.68) следует, что толщина h_σ упрочненного слоя составляет у заготовок, обработанных растачиванием, 5 мкм, вибросверлением с последующим дорнованием — 61 мкм.

Измерение величины H_μ осуществлялось на шлифах косых срезов (угол $3^\circ 50'$) на приборе Neophot-2 (Германия). Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя при сверлении и вибросверлении представлено на рис. 2.69, *а*, из которого следует, что по мере приближения к поверхности отверстия микротвердость возрастает с 74 до 96 (кривая 1) и до 98 (кривая 2). При этом максимальное значение C_y металла достигает 29,7 % при сверлении и 32,4 % при вибросверлении.

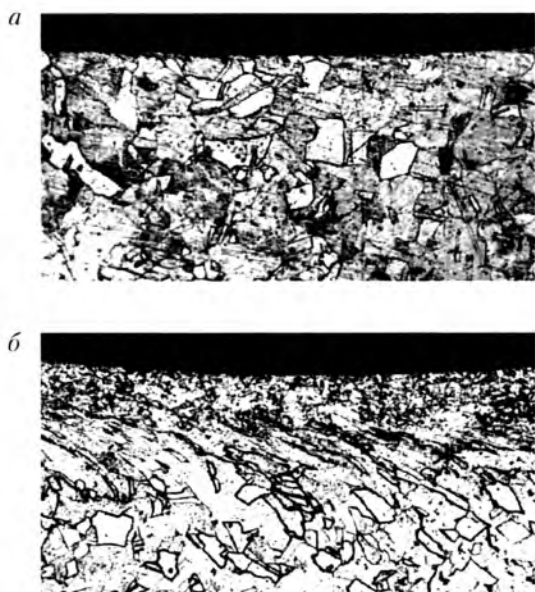


Рис. 2.68. Микроstructure подповерхностного слоя материала трубок из меди М1НТ при обработке:

а — растачиванием; *б* — вибросверлением с последующим дорнованием ($\times 400$)

Изменение величины H_μ при сверлении, вибросверлении и дорновании после вибросверления отверстий диаметром 6 мм в заготовках из сплавов ХН67ВМТЮ и ВТЗ-1 проиллюстрировано на рис. 2.69, б. Дорнование сульфидированным хромированными дорнами осуществлялось в режиме уменьшения значения Ra поверхности с 0,7 до 0,17 мкм. Из рассмотрения зависимостей следует,

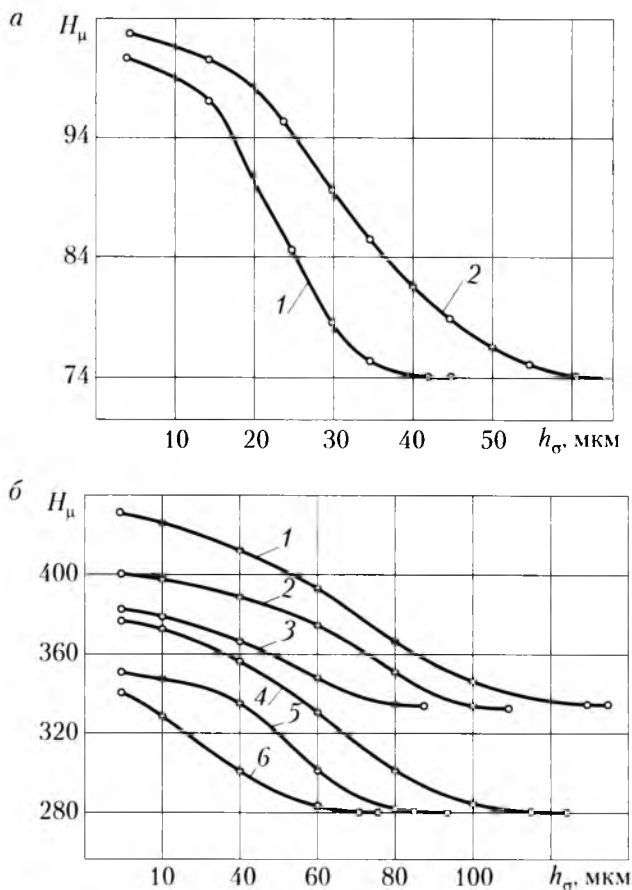


Рис. 2.69. Микротвердость:

а — меди М1НТ при сверлении (кривая 1) и вибросверлении (кривая 2); б — никелевого ХН67ВМТЮ (кривые 1, 2, 3) и титанового ВТЗ-1 (кривые 4, 5, 6) сплавов при сверлении (кривые 3, 6), вибросверлении (кривые 2, 5) и дорновании (кривые 1, 4)

что наибольшие значения H_{μ} , C_y и h_{σ} упрочненного слоя обеспечивает комбинированная обработка, далее следуют вибросверление и сверление.

При сверлении сплавов обеспечиваются: ХН67ВМТЮ — $H_{\mu \max} = 386$ мкм, $h_{\sigma \max} = 80$ мкм, C_y до 13,5 %; ВТЗ-1 — $H_{\mu \max} = 339$, $h_{\sigma \max} = 72$ мкм, C_y — 21 %. При вибросверлении сплавов достигаются: ХН67ВМТЮ — $H_{\mu \max} = 400$, $h_{\sigma \max} = 100$ мкм, C_y до 17,6 %, ВТЗ-1 — $H_{\sigma \max} = 352$, $h_{\sigma \max} = 80$ мкм, C_y до 25,7 %.

При дорновании сплавов имеют место показатели: ХН67ВМТЮ — $H_{\mu \max} = 428$, $h_{\sigma \max} = 130$ мкм, C_y до 26 %; ВТЗ-1 — $H_{\mu \max} = 380$, $h_{\sigma \max} = 116$ мкм, C_y до 36 %.

Уместно отметить высокую производительность вибросверления и дорнования, превышающую производительность растачивания отверстий в 8,8–12 раз, и повышенную стойкость инструмента. Стойкость вибросверл повышается по сравнению со стойкостью спиральных сверл в 10 и более раз, стойкость сульфидированных дорнов возрастает по сравнению с несulfидированными дорнами в 2 раза и более [6].

На используемых для вибросверления виброустановках применяются различные виброголовки. На рис. 2.70 показаны схемы виброголовки механогидравлического действия и насосных станций, которыми оснащена виброустановка ВУ-2. При вращении заготовки 1 с частотой n_3 вибросверло 2, установленное в патроне 3, подается и вибрирует. Механические колебания золотнику 12 через шарикоподшипник 15 сообщаются кулачком 11 с эксцентриситетом e . Золотник 12 совершает возвратно-поступательное движение с частотой, равной частоте вращения кулачка 11 на валу 10 вариатора, состоящего из шкивов 5, 9 и ремня 6 и приводимого в действие от электродвигателя 4 (M_5 , АОЛ-2, $N = 0,18$ кВт, $n = 3000$ мин⁻¹).

При сдвиге золотника 12 влево масло из полости 7 поступает в полость 8 вибросверильной головки. Поршень-шпиндель 23 размещенный в корпусе 13, вместе с инструментом перемещается влево. Масло из полости 24 через полость 26 сливается в бак 20. При дальнейшем повороте кулачка 11 золотник 12 под действием пружины 25, обеспечивающей также постоянный контакт ролика (шарикоподшипника) 15 с кулачком 11, размещенным на валу 10, перемещается вправо. Тогда полость 8 через полость 14 соединяется

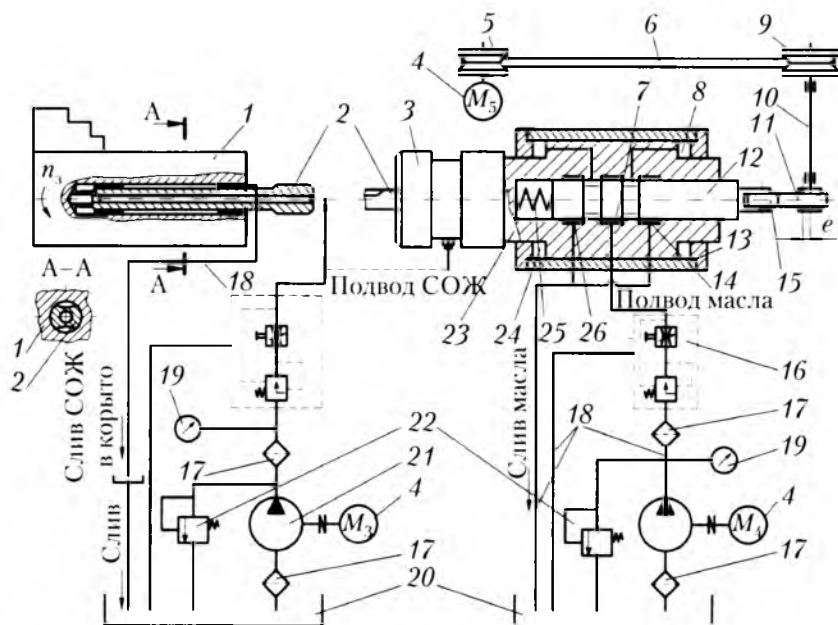


Рис. 2.70. Виброголовка механогидравлического действия с гидравлической схемой виброустановки ВУ-2

со сливной магистралью, а полость 20 через полость 7 — с нагнетательной. При этом поршень-шпindel 23 перемещается вправо. Так совершается осевая вибрация вибросверла 1 при вращении кулачка 11.

Насосная станция подачи СОЖ состоит из насоса 21 (БГ12-22), электромотора 4 (M_3 , А02-42-4, $N = 5,5$ кВт, $n = 1440$ мин⁻¹), соединенного с насосом посредством муфты, фильтров 17 грубой на заборном патрубке (сетка) и тонкой (0.8Г41-14) очистки, предохранительного клапана 22 (Г51-22), дросселя 16 (Г55-32), манометра 18 (ОБМГН-160), бака 20 емкостью 100 л и трубопроводов 18. СОЖ в зону резания поступает через продольное и радиальное отверстия вибросверла 1 и вместе с вымываемой дробленой стружкой по каналам, образованным канавками вибросверла и поверхностью отверстия заготовки 2, попадает в поддон станка, откуда поступает в бак 20. Подача СОЖ при использовании виброголовки резцедержателя осуществляется системой подачи жидкости станка.

Насосная станция обеспечения работы вибросверлильной головки имеет насос 21 (БГ12-22), рассчитанный на расход жидкости в виде индустриального масла И-12А до 50 л/мин и давление $P_1 = 6,3$ МПа, электродвигатель 4 (M_4 , АО2-41-4) с $N = 4$ кВт и $n = 1440$ мин⁻¹, фильтры 17 грубой (сетка) и тонкой (0,12Г41-14) очистки, предохранительный клапан 22 (Г12-34) и бак 20 емкостью 100 л. Рабочая жидкость поступает в вибросверлильную головку по подводному и возвращается в бак по сливным трубопроводам 18. Дроссели 16 служат для регулирования расхода жидкости. Предохранительные клапаны 22 предназначены для защиты гидросистем от возрастания давления, которое контролируется по манометрам 19.

Для размещения вибросверл используются прецизионные патроны механогидравлического действия с гидроприемниками. При невращающемся вибросверле патрон и гидроприемник представляют собой совмещенную конструкцию (рис. 2.71, а), при вращающемся — патрон и гидроприемник выполнены отдельно (рис. 2.71, б). При навинчивании гаек 2 на корпуса 6 патронов втулка 4 удерживается от поворота шпонками 3, и тогда плунжеры 15, 18 создают высокое гидростатическое давление в полости размещения гидропластмассы 16, 19 и за счет деформации тонкостенных оболочек втулок 17, 21 с продольными пазами обеспечивают зажим инструмента 1. Втулки 17 и 21 сменные и для каждого типоразмера инструмента имеют свой размер отверстия. Резиновые трубки 19, 20 и кольца 5 (на рис. 2.71, б) выполняют роль уплотнений. Штуцеры 5 (рис. 2.71, а) и 10 (рис. 2.71, б) предназначены для подвода СОЖ от насосных станций.

Корпус 6 (см. рис. 2.71, а) соединен с помощью резьбы с планшайбой 9, которая установлена на поршне-шпинделе 11 виброголовки посредством радиального 8 и упорного 10 шарикоподшипников. Гайка 7 предназначена для закрепления патрона на поршне-шпинделе и регулировки затяжки подшипникового узла. Патрон (рис. 2.71, б) закреплен на виброшпинделе 13 посредством резьбы и гайки 7. СОЖ через штуцер 10 поступает в выточку втулки 11 и оттуда через радиальные отверстия — в канал виброшпинделя 13. С помощью крышек 8 и гаек 7 вся система гидроприемника, состоящая из упорных шарикоподшипников 14, уплотнительных манжет 15, шайб 16, стягивается. При вибросверлении гидроприемник удерживается от вращения угольником 9.

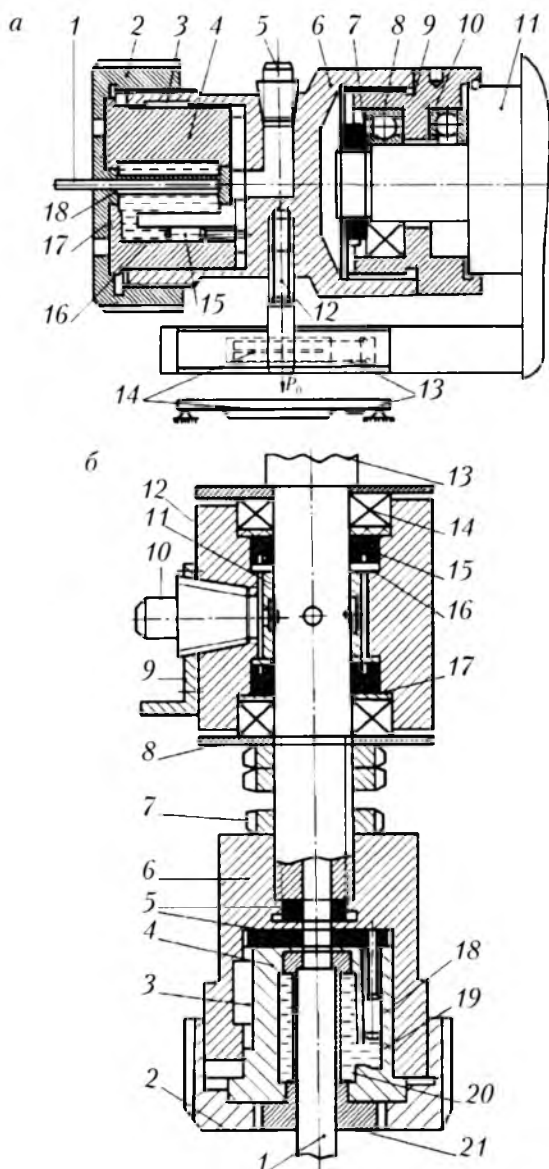


Рис. 2.71. Прецизионные механогидравлические патроны с гидроприемниками

В виброустановках использованы различные датчики моментов резания. В виброустановке ВУ-1 использован тензорезистор, наклеенный на балку равного сопротивления, закрепленную консольно на вибросверле и опирающуюся в упор на корпусе виброголовки [6, 9].

На виброустановке ВУ-2 датчиковая система выполнена в виде расположенной на двух опорах балки 13 (см. рис. 2.71, *а*) и наклеенного на нее тензорезистора 14. Рычаг 12 с помощью резьбы закреплен на корпусе 6 и путем упора в балку 13 удерживает патрон от вращения, прогибая балку с силой P_0 , пропорциональной моменту резания на сверле. Виброустановка ВУ-6 снабжена датчиковой муфтой реостатного действия.

В систему задатчика устройства вводится уровень $M = 0,7M_{кр}$ (здесь $M_{кр}$ — критический момент резания, при котором возможна поломка вибросверла), который поступает в систему сравнения. При достижении фактическим моментом резания уровня M в систему управления поступает сигнал на отключение двигателей привода вибрации и насосной станции подачи СОЖ и переключение на обратное вращение реверсивного двигателя. При этом обеспечивается отключение вращения и вибрации инструмента, подачи СОЖ и включение перемещения стола в обратном направлении (вниз) до полного выхода вибросверла из отверстия заготовки (до упора). После этого обеспечивается замена инструмента или его перезатачивание.

Важным элементом виброустановок являются специальное направляющее вибросверло и препятствующие его продольному изгибу устройства (рис. 2.72, *а, б*) с двумя стенками 3, 6 и втулками 2, 7. Заготовка 11 устанавливается в патроне, например виброустановки ВУ-2, и вращается с частотой n_3 . Вибросверло 8 подается с подачей S и вибрирует. Стенка 3 установлена на стойке 10, размещенной на направляющих станины станка, а стенка 6 размещена на направляющих штангах 4 и подпружинена пружиной 5. В начальный период вибросверления (рис. 2.72, *а*) втулка 2 направляет, а втулка 7 поддерживает вибросверло и предотвращает его продольный изгиб. В конце сверления патрон 9 воздействует на подвижную стенку 6 и сближает ее со стойкой 10 вплоть до контактирования (рис. 2.72, *б*). Поперечные сечения вибросверла 8, направляющей и поддерживающей втулок 2 и 7 показаны на рис. 2.72, *в*.

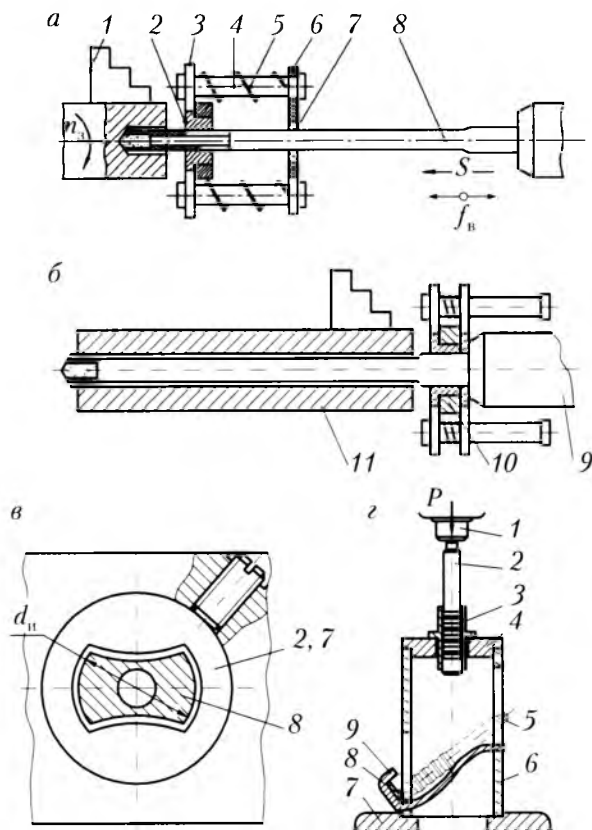


Рис. 2.72. Устройства для комбинированной обработки отверстий прецизионных деталей

Для удобства и повышения производительности дорнования используется устройство (рис. 2.72, з), которое содержит установочный элемент 4, корпус 6, основание 7, ловитель 9 с амортизатором 8. Под действием пуансона 1 с силой P дорн 2 проталкивается через отверстие заготовки 3 и, выходя из нее, падает, занимая положение 5, удобное для его вытаскивания из приспособления и дальнейшего использования для обработки последующих заготовок.

2.3.9. Методика расчета параметров и изменение микрогеометрии поверхностей при обработке ППД

Расчет параметров микрогеометрии, в том числе и РМР поверхностей при обработке ППД шарами, гладкими роликами и алмазными наконечниками, разрозненно представлен в ряде источников [4–9, 15, 16, 20, 21]. Практически не нашли отражение в литературе вопросы расчета микрогеометрии при вибронакатывании различными профильными роликами. Поэтому ниже наибольшее внимание уделено микрогеометрии поверхностей, обеспечиваемых вибронакатыванием профильными роликами и расчету их параметров.

В результате экспериментальных исследований и анализа их результатов получены математические модели зависимостей $Ra_p = f'(P)$, $Ra_S = f''(S)$, $Ra_v = f(v)$ для профильных роликов: 1 — гладкого, 2 — синусоидального с постоянными параметрами, 3 — синусоидального с переменной длиной волны λ , 4 — синусоидального с переменной амплитудой, 5 — косинусоидального. После соответствующей обработки полученных моделей и расчета коэффициентов построены трехфакторные модели $Ra = f(P, S, v)$ для всех перечисленных выше профильных роликов:

$$1 - Ra = 2,3 - 0,003P + 0,000003P^2 + 7,1S - 7,8S^2 - \\ - 0,02v + 0,00015v^2;$$

$$2 - Ra = 0,7 - 0,003P + 0,000005P^2 + 6,6S + 4,6S^2 - \\ - 0,001v + 0,000013v^2;$$

$$3 - Ra = 0,1 - 0,008P + 0,00001P^2 + 2,1S + 0,8S^2 - \\ - 0,0016v + 0,00001v^2;$$

$$4 - Ra = 3,2 - 0,015P + 0,0000P^2 + 4,0S + 3,9S^2 - \\ - 0,038v + 0,00002v^2;$$

$$5 - Ra = 1,6 - 0,005P + 0,000007P^2 + 0,8S + 0,6S^2 - \\ - 0,0012v + 0,00001v^2,$$

где P — сила поджима ролика к обрабатываемой поверхности, даН; S — подача ролика, мм/об; v — скорость обкатывания ролика, м/мин.

Для взаимосвязанного выбора параметров режима обработки ППД с обеспечением разнovidности 0 поверхности (ПРМР) и заданного значения Ra при различных сочетаниях величины P , S , v и для различных по конструкции роликов построены номограммы (рис. 2.73).

Исследованиями установлено, что приканавочные наплывы, возникающие при вибронакатывании и вибровыглаживании поверхностей в режиме создания ЧРМР, являются регулярными поднутренными неровностями (РПН). При известной силе P глубина h

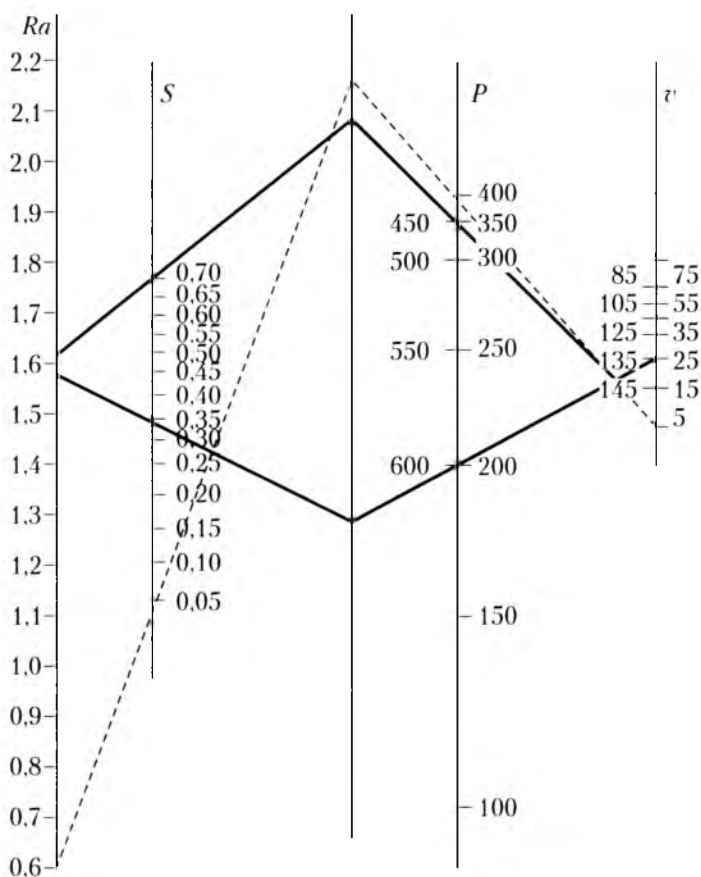


Рис. 2.73. Номограмма зависимости $Ra = f(P, S, v)$ при вибронакатывании профильным синусоидальным роликом с переменной длиной волны λ

канавки и высота h_n приканавочных наплывов, равная величине h_n , могут определяться из выражений [9]:

$$h = \frac{12,55P}{HVr_p}, \quad (2.10)$$

$$h_n = h_n = \frac{6,39P}{HVr_p}, \quad (2.11)$$

где HV — твердость обрабатываемого материала по Виккерсу; r_p — радиус скругления ролика, алмазного выглаживателя или другого деформирующего инструмента.

Путем деления выражения (2.10) на выражение (2.11) определено значение коэффициента K_{np} высоты ПН:

$$K_{np} = h_n/h = 0.506.$$

По величине K_{np} и зависимости для определения глубины h получены формулы расчета превышения величины h_n РПН над уровнем Rz при вибронакатывании и вибровыглаживании поверхностей заготовок с образованием ЧРМР:

□ для инструмента сферической формы (шар, алмазный наконечник)

$$h_n = \frac{6,25(K_{no}P)^{0,732}}{d_{ш}^{0,809} D_3^{0,329}}, \quad (2.12)$$

□ для профильных роликов

$$h_n = \frac{7,44(K_{no}P)^{0,81}}{r_p^{0,8} D_3^{0,3}} \sqrt{\frac{d_p}{r_p}}, \quad (2.13)$$

где K_{no} — коэффициент обрабатываемости материала в сравнении с титановым сплавом ВТ1-1, принимается по табл. 2.2; P — сила поджима инструмента к поверхности, даН; $d_{ш}$ — диаметр шара и сферы наконечника, мм; D_3 — диаметр обрабатываемой заготовки, мм; d_p — диаметр ролика, мм; r_p — радиус скругления ролика, мм.

Применительно к прецизионным деталям наиболее приемлемым путем управления микрогеометрией и обеспечения разнородностей (см. табл. 2.6) рабочих поверхностей является переменное силовое воздействие деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность.

Поверхности вида 0 обеспечиваются накатыванием, алмазным выглаживанием, вибронакатыванием и вибровыглаживанием поверхностей, обработанных лезвийным инструментом в режиме создания ПРМР с силой $P = P_p$ (здесь P_p — расчетная сила поджима инструмента к поверхности). Поверхности разновидностей 1, 2, 3, 4 обеспечиваются перечисленными выше способами обработки ППД с силами соответственно

$$P_1 = 0,75P_p; \quad P_2 = 0,6P_p; \quad P_3 = 0,45P_p; \quad P_4 = 0,3P_p.$$

Поверхность разновидности 5 создается финишной обработкой резанием и не подвергается «прикатыванию» неровностей, как это делается для обеспечения разновидностей 1, 2, 3, 4. Разновидность поверхности с ЧРМР определяется значениями h_n и N_n , для обеспечения которых могут рассчитываться параметры режима обработки исходя из формул (2.12), (2.13) и других зависимостей [6].

Наиболее информативным параметром, характеризующим контактирование реальных поверхностей, является относительная опорная площадь $F_{оп}$, которая вычисляется по формуле

$$F_{оп} = \frac{A_r}{A_n} 100 \%,$$

где A_r — фактическая площадь контакта; A_n — номинальная площадь контактирующей поверхности.

Для определения площади $F_{оп}$ используется метод построения кривой фактической площади A_r контакта по двум профилограммам [5]. Сущность метода заключается в том, что с поверхности снимаются профилограммы продольной и поперечной шероховатости. По профилограммам строятся кривые зависимости опорной длины η_p профиля от высоты (уровня сечения) p ее расположения относительно линии выступов (ГОСТ 2789–73). Абсциссы кривых, соответствующие одному и тому же уровню p сечения профиля, перемножаются, и строится кривая для величины $F_{оп}$. Из сказанного следует, что значение $F_{оп}$ на определенном уровне p можно найти по формуле

$$F_{оп} = \frac{\eta_{пр} \eta_{поп}}{l^2} 100 \%,$$

где $\eta_{пр}$, $\eta_{поп}$ — опорная длина продольного и поперечного профилей на уровне p в пределах базовой длины l .

Для снятия профилограмм продольной шероховатости цилиндрических поверхностей на профилографе-профилометре мод. 201 или 253 можно использовать приспособление, представленное на рис. 2.27.

Поверхности с ЧРМР в соответствии с ГОСТ 24773–81 могут быть пяти видов (см. рис. 2.37). Вибронакатыванием обеспечиваются виды 3, 4, 5 (см. рис. 2.37, 2.39). При этом на обрабатываемую поверхность наносятся регулярные неровности вогнутой формы – канавки, являющиеся следом деформирующего инструмента. Поверхности с ЧРМР характеризуются относительной площадью $F_{\text{н}}$, занимаемой регулярными неровностями (канавками):

$$F_{\text{н}} = \frac{A_{\text{к}}}{A_{\text{н}}} 100 \%,$$

где $A_{\text{к}}$ – площадь номинальной поверхности $A_{\text{н}}$, занятая канавками.

Выведены формулы аналитического расчета величины $F_{\text{н}}$ поверхностей с частично регулярными микронеровностями, образованными вибронакатыванием шарами и вибровыглаживанием алмазными наконечниками, вибронакатыванием профильными, например синусоидальными, роликами с постоянными параметрами. Для расчета необходимо знать ширину $b_{\text{к}}$ канавки, которая определяется по формулам:

□ для сферического инструмента

$$b_{\text{к}} = 2K_{\text{в}} \sqrt{d_{\text{ш}} h},$$

□ для скругленных роликов

$$b_{\text{к}} = 2,83K_{\text{в}} \sqrt{r_{\text{р}} h},$$

где $K_{\text{в}}$ – коэффициент ширины канавки, характеризующий упругое последствие материала, и являющийся отношением фактической ширины канавки к расчетной (теоретической); $d_{\text{ш}}$ – диаметр шара, сферы алмазного наконечника, мм; $r_{\text{р}}$ – радиус округления профильных роликов, мм; h – глубина канавки, мм.

Коэффициент $K_{\text{в}}$ можно определять по зависимостям:

□ для сферического инструмента

$$K_{\text{в}} = \frac{0,818K_{\text{но}}D_3^{0,029}}{h^{0,077}d_{\text{ш}}^{0,037}},$$

□ для роликов

$$K_{\text{в}} = \frac{0,802 K_{\text{но}} D_3^{0,025}}{h^{0,07} (2r_{\text{п}})^{0,04}},$$

где D_3 — диаметр заготовки, мм; $K_{\text{но}}$ — коэффициент обрабатываемости в сравнении со сплавом ВТ1-1, принимается по табл. 2.2.

Глубина h канавок может определяться также по формулам (с учетом коэффициента $K_{\text{пр}} = h_{\text{п}}/h = 0,506$ и формул (2.12) и (2.13)):

□ для сферического инструмента

$$h = \frac{12,352 (K_{\text{но}} P)^{0,732}}{d_{\text{ш}}^{0,809} D_3^{0,329}},$$

□ для профильных закругленных роликов

$$h = \frac{14,706 (K_{\text{но}} P)^{0,81}}{r_{\text{п}}^{0,8} D_3^{0,3}} \sqrt{\frac{d_{\text{п}}}{r_{\text{п}}}},$$

где P — сила поджима инструмента к обрабатываемой поверхности, Н; $d_{\text{п}}$ — диаметр ролика, мм.

По ширине $b_{\text{к}}$ определяется площадь $F_{\text{в}}$ волны неровности (канавки) в виде синусоиды по формуле

$$F_{\text{в}} = \frac{b_{\text{к}} \lambda [2D_3 + D_3^2 + (2A\pi D_3 / \lambda)^2]}{3D_3},$$

где λ — длина волны неровности, мм; $2A$ — амплитуда колебания (вибрации), мм.

Относительная площадь $F_{\text{н}}$ определяется по формулам:

□ для ЧРМР вида 3, обеспечиваемых при подачах $S \geq b_{\text{к}}$, если отношение $i = i + i_0 = n_{\text{дв.к.}}/n_3$ (для обработки сферическим инструментом с источниками вибрации) или $i = i_{\text{п}} + i_0 = \pi D_3 / \lambda$ (для обработки профильными роликами) является целым числом, $S \geq 2A + b_{\text{к}}$, когда отношение i — не целое число (с дробью) —

$$F_{\text{н}} = \frac{F_{\text{в}}}{\lambda S} 100 \%;$$

□ для ЧРМР вида 4 при $2A - b_{\text{к}} < S < 2A + b_{\text{к}}$ —

$$F_{\text{н}} = \left(F_{\text{в}} - \frac{\Sigma}{\lambda S} \right) 100 \%;$$

□ для ЧРМР вида 5 при $b_k < S < 2A$ —

$$F_n = \left(F_b - \frac{2\Sigma_r}{\lambda S} \right) 100 \%,$$

где S — подача, мм/об; Σ и Σ_r — площади областей микрорельефов соответственно видов 4 и 5, по которым канавки проходят более одного раза (см. рис. 2.37 и 2.39).

Площади Σ и Σ_r могут определяться по формулам

$$\Sigma = 5,33\lambda A \left(i_0 + i_0^2 + \frac{b_k - S}{8A} \right)^{1,5},$$

$$\Sigma_r = \frac{b_k^2 [2D_3 + (\pi D_3 / \lambda)^2 (4A - S^2)]}{2AD_3 \sqrt{4A^2 - S^2}},$$

где i_0 — дробная часть отношения i .

Направление следов обработки при образовании РМР определяется по выражению

$$\gamma = \arctg \frac{2Ai}{D_3}.$$

Для ПРМР число выступов (впадин), приходящихся на квадрат, например 25×25 мм, можно определить по формуле

$$N = \frac{625i}{\pi D_3 S}.$$

Динамику изменения параметров микрогеометрии обточенной цилиндрической поверхности (рис. 2.74, а, случай 1) стали 38ХНВА (твердость 269 НВ, прочность $\sigma_b = 1100$ МПа; относительное удлинение $\delta = 12$ %) при обкатывании ее шаром диаметром 9,5 мм с различными силами P можно проследить по рис. 2.74, а (случай 2–7 — силы обкатывания, соответственно равные 100, 200, 300, 400, 500 и 600 Н). Из рис. 2.74, б следует, что необходимое сближение (уровень) p с целью обеспечения $t_p = 75$ % для приведенных случаев различно.

На рис. 2.75 представлены снятые с помощью слепков профилограммы поперечной шероховатости рабочей поверхности аэродинамических опор (чаш), обработанных резанием и ППД. Анализ профилограмм показывает, что при растачивании обеспечивается

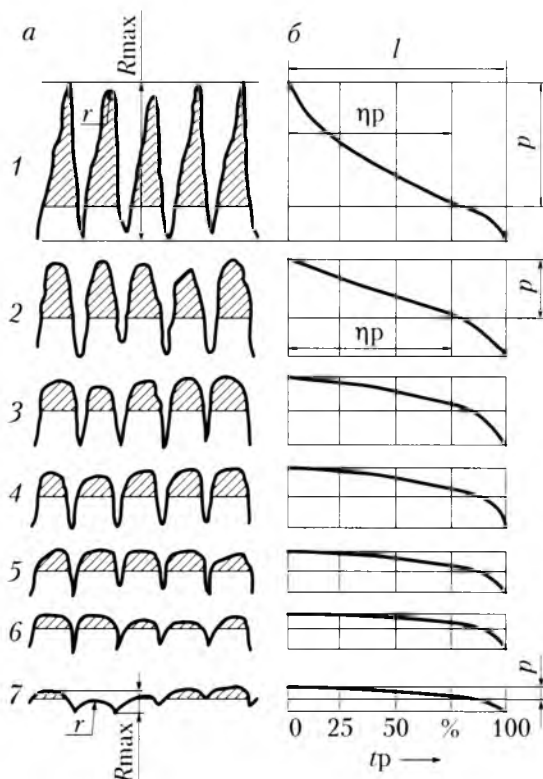


Рис. 2.74. Динамика изменения профиля микрогеометрии обточенной цилиндрической поверхности (сталь 38ХНВА) при обкатывании шаром: *a* — профилограммы поверхностей (вертикальное увеличение — $\times 2000$, горизонтальное — $\times 80$); *б* — кривые относительной опорной длины профиля

шероховатость поверхности с крутыми заостренными микронеровностями, значение относительной опорной площади $F_{\text{оп}} = 0.73 \%$ (рис. 2.75, *a*). При раскатывании ($d_{\text{ш}} = 7.1$ мм; $P = 20$ Н) шероховатость поверхности приобретает более волнообразную и обтекаемую форму: $F_{\text{оп}} = 4.2 \%$ при $S = 0.025$ мм/об (рис. 2.75, *б*); $F_{\text{оп}} = 3.3 \%$ при $S = 0.05$ мм/об (рис. 2.75, *в*); $F_{\text{оп}} = 0.43 \%$ при $S = 0.1$ мм/об (рис. 2.75, *г*); $F_{\text{оп}} = 0.31 \%$ при $S = 0.2$ мм/об (рис. 2.75, *д*). Уменьшение значения $F_{\text{оп}}$ при раскатывании с подачами $S = 0.1$ и 0.2 мм/об по сравнению с поверхностью, полученной при растачивании, можно объяснить неполным перекрытием шаром обрабатываемой

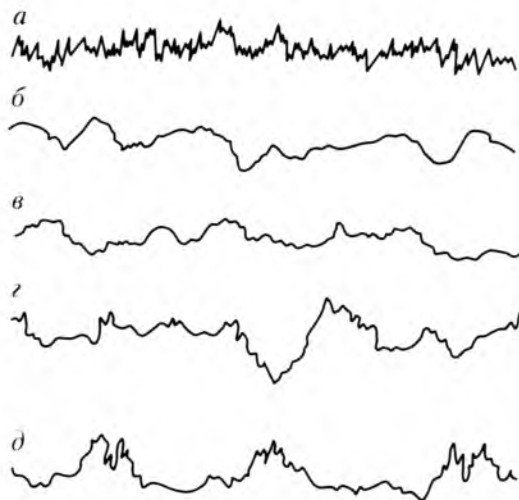


Рис. 2.75. Профилограммы поперечной шероховатости сферической поверхности опор (бронза БрО8С12), обработанных:
 а — растачиванием ($R_z = 2$ мкм); б–д — раскатыванием шаром с подачами соответственно 0,025, 0,05, 0,1, 0,2 мм/об. Увеличение вертикальное — $\times 10\,000$, горизонтальное — $\times 20$

поверхности. В этом случае величина $F_{оп}$ определяется участками исходной поверхности с прикатанными неровностями (рис. 2.75, г) или с неровностями, не подвергнутыми воздействию шара (рис. 2.75, д).

Как видно из графика (рис. 2.76, а), увеличение силы P при обкатывании сплава ВТ5 до 600 Н приводит вместе с уменьшением высоты неровностей R_z поверхности с 8,1 до 0,8 мкм к увеличению относительной опорной длины профиля t_p с исходного значения 0,7 %, обеспечиваемого обтачиванием, до 39 % при первоначальном контакте (без сближения) и с 3,5 до 60 % соответственно при сближении $p = 0,5$ мкм. При этом (рис. 2.76, б) значение $F_{оп}$ уменьшается с увеличением подачи S до 0,17 мм/об, а далее снижается более резко. При виброобкатывании значение $F_{оп}$ уменьшается плавно с возрастанием подачи на всем протяжении.

На рис. 2.77, а показано влияние силы поджима P на среднее арифметическое отклонение профиля Ra поверхности при обработке никелевого ХН67ВМТЮ и титанового ВТЗ-1 сплавов ($D_3 = 44,5$,

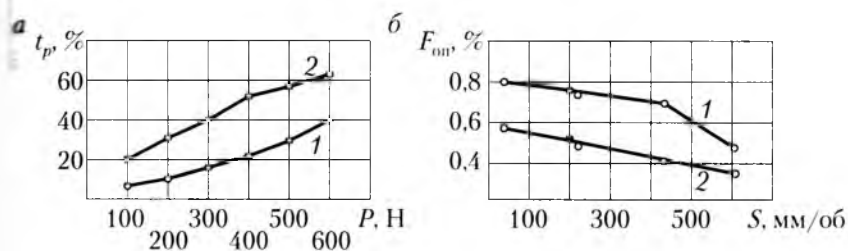


Рис. 2.76. Зависимости относительных опорной длины профиля и опорной площади $F_{оп}$ от параметров режима обработки ППД:

a — от силы P при обкатывании сплава ВТ5 (кривая 1: $p = 0$, кривая 2: $p = 0,5$ мкм); b — от подачи S (сплав ВТ1-1, кривая 1 — обкатывание при $D_3 = 24,5$ мм, $d_{ин} = 9,5$ мм, $n_3 = 1250$ мин⁻¹; кривая 2 — виброобкатывание, ПРМР, $n_{дв.х} = 2800$ мин⁻¹, $2A = 2$ мм)

$Ra_{исх} = 1,9...2,0$ мкм). Для получения шероховатости поверхности с $Ra = 0,16...0,32$ мкм необходима сила обкатывания $P = 260...370$ Н для сплава ХН67ВМТЮ и $250...500$ Н для сплава ВТ3-1.

Из зависимости величины Ra от величины P при алмазном выглаживании ($r_p = 2,5$ мм; $P = 10...90$ Н) внутренней поверхности бронзовых втулок верхней головки шатунов автотракторных двигателей СМД-14 (рис. 2.77, б) следует, что алмазным выглаживанием можно уменьшить шероховатость поверхности с $0,63...1,5$ мкм (предшествующая обработка — растачивание) до $0,08...0,32$ мкм.

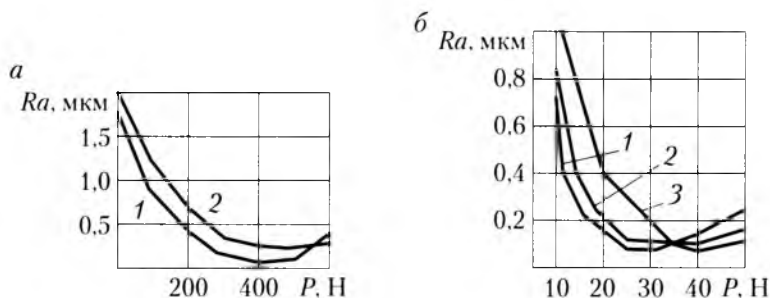


Рис. 2.77. Влияние силы поджима инструмента на среднее арифметическое отклонение профиля поверхности:

a — при обкатывании шаром сплава ХН67ВМТЮ (кривая 1) и сплава ВТ3-1 (кривая 2); b — при алмазном выглаживании втулок из бронз БрО8С12 (кривая 1), БрОЦС4-4-2.5 (кривая 2) и БрОЦС5-5-5 (кривая 3)

Для получения шероховатости $Ra = 0,16 \dots 0,63$ мкм достаточна сила выглаживания $P = 15 \dots 40$ Н для бронз БрО8С12 и БрОЦС4-4-2,5 и $P = 25$ Н — для бронзы БрОЦС5-5-5.

На рис. 2.78, а показана зависимость величины Rz от силы P при раскатывании (кривая 1) и виброраскатывании (кривая 2) пневмоцилиндров из стали 12Х18Н10Т диаметром $D_3 = 125$ мм. Обработка пластическим деформированием производилась шаром $d_{ш} = 10$ мм с помощью электромагнитной виброголовки (см. рис. 2.32, б). Исходная высота неровностей поверхности перед обработкой пластическим деформированием обеспечивалась растачиванием и находилась в пределах $Rz = 4,8 \dots 5,2$ мкм.

На рис. 2.78, б представлена зависимость радиуса r округления неровностей и отношения $r/R_{\max}$ от силы P при виброобкатывании сплава ВТ1-1 с обеспечением ПРМР, полученного при $d_{ш} = 19$ мм; $D_3 = 37,5$ мм; $Ra_{\text{исх}} = 9,2$ мкм. При виброобкатывании можно, регулируя лишь один из всех параметров режима обработки виброобкатыванием (силу P), изменять величину r с исходного значения после обтачивания 166 до 1680 мкм и отношение $r/R_{\max}$ с исходного 13,8 до 990.

Для сравнения в табл. 2.15 приведены геометрические характеристики качества поверхностей, получаемых при различных способах обработки резанием и ППД.

Из табл. 2.15 следует, что поверхности, обработанные ППД, обладают высокой однородностью микронеровностей. Наименьшее

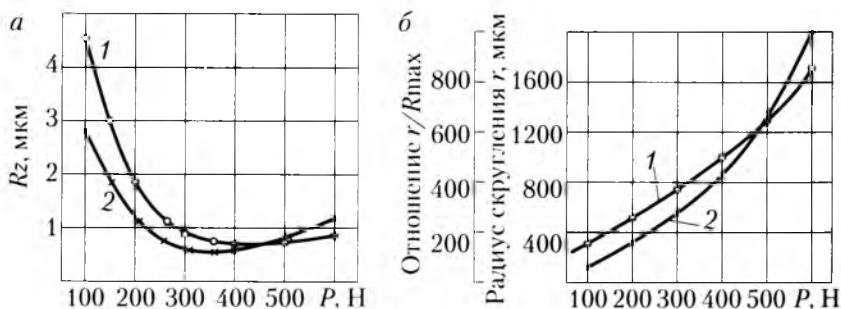


Рис. 2.78. Влияние силы P поджима инструмента-шара на:
 а — высоту Rz неровностей (кривая 1 — раскатывание, кривая 2 — виброраскатывание); б — радиус r округления неровностей (кривая 1) и отношение $r/R_{\max}$ (кривая 2)

среднее квадратическое отклонение неровностей по высоте σ_p ($Ra = 1,25 \dots 2,5$ мкм) наблюдается у вибронакатанных поверхностей.

Таблица 2.15

**Параметры микрогеометрии поверхностей,
обработанных резанием и ППД**

Вид обработки	Шероховатость поверхности Ra , мкм	r , мкм	α , град.	$r/R_{\max}$	σ_p , мкм
Обтачивание	10...20*	150	11...18	7,5	1,47
	1,25...2,5	—	8...12	—	1,29
Шлифование	1,25...2,5	8	4...7	0,8	0,81
	0,16...0,32	12	—	7,5	0,55
Накатывание	1,25...2,5	—	7...14	127	0,92
	0,16...0,32	1 000	2...3	—	0,40
Вибронакатывание	1,25...2,5	1 400	3...5	100	0,63
	0,16...0,32	12 200	1...1,3	7 630	0,32

* Данное значение относится к параметру Rz .

При точении, шлифовании, накатывании и алмазном выглаживании направление следов обработки, например на цилиндрической поверхности, представляет собой кольцевую или винтовую линию с углом подъема, регулируемым лишь в пределах от $10'$ до 2° . При вибронакатывании угол γ может изменяться от $10'$ до 88° .

2.3.10. Физико-механические параметры состояния подповерхностного слоя материала и особенности комбинированных и смещенных процессов обработки с использованием ППД

Отделочно-упрочняющая обработка ППД приводит к изменению состояния подповерхностного слоя материала и, в частности, его микроструктуры, твердости, остаточных напряжений, микротвердости, степени упрочнения и толщины упрочненного слоя [3–11, 15, 20, 22].

На рис. 2.79 представлены микроструктуры четырех образцов (сплав ВТ1-1) с обработкой резанием и ППД. Структура подповерх-

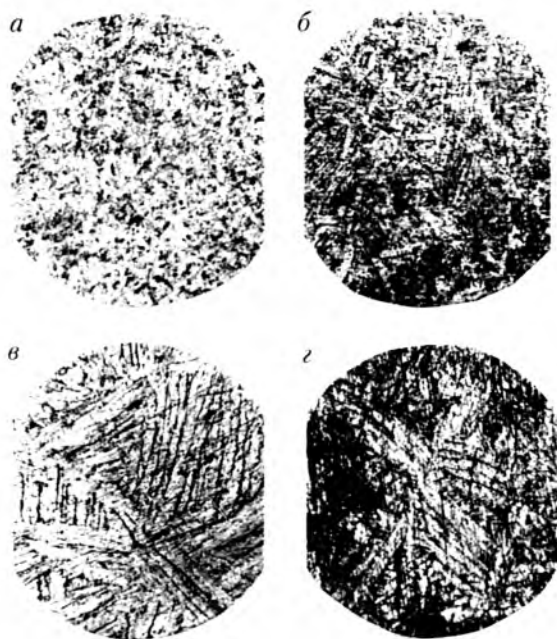


Рис. 2.79. Микроструктура подповерхностного слоя титанового сплава при обработке:

а — торцовым точением (256 HV); *б* — плоским шлифованием (277 HV); *в* — накатыванием шаром ($P = 100$ Н, $d_{ш} = 5,6$ мм; 268 HV); *г* — вибронакатыванием (ПРМР, $n_{дв.х} = 2700$ мин⁻¹; $2A = 2$ мм; 301 HV). Увеличение $\times 40$

ностного слоя обточенного образца (рис. 2.79, *а*) почти не изменилась; на шлифованном образце (рис. 2.79, *б*) наблюдаются искажения структуры и плоскости сдвига; на шлифах образцов, обработанных ППД (рис. 2.79, *в* и *г*), хорошо просматриваются искажения структуры и система плоскостей сдвига кристаллитов.

Из зависимости поверхностной твердости HV от силы P обкатывания шаром (рис. 2.80, *а*) следует, что с возрастанием силы P увеличиваются и значения HV: для стали 12Х18Н9Т — от исходного 181 до 342 (кривая 1); для титанового сплава ВТЗ-1 — от 319 до 390 (кривая 2) и для никелевого сплава ХН67ВМТЮ — от 282 до 412 (кривая 3).

При обработке ППД деталей из бронзы БрО8С12 твердость повышается от исходной 77,6 до 94,5 при обкатывании шаром

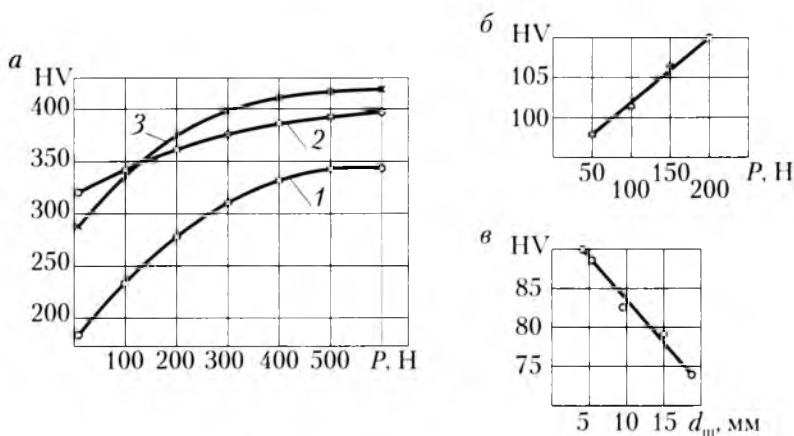


Рис. 2.80. Влияние силы поджима P и размера инструмента на поверхностную твердость при накатывании:
а, в – шаром; б – профильным роликом

($d_{\text{ш}} = 7.1$ мм), до 96.5 при обкатывании шаром с $d_{\text{ш}} = 4.75$ мм и до 99.2 при алмазном выравнивании наконечником с радиусом сферы $r_c = 3.25$ мм.

Зависимости величины HV от силы P обкатывания роликом наружной цилиндрической поверхности заготовки из силумина АК-9 (АЛ4) с исходной твердостью HV 68 и размера инструмента при обкатывании профильным роликом и шаром показаны на рис. 2.80, б и в. Из графика (рис. 2.80, б) видно, что с увеличением P с 50 до 200 Н при обкатывании цилиндрической поверхности диаметром $D_3 = 90.5$ мм роликом ($d_p = 45$ мм; $r_p = 4$ мм) величина HV повышается до 110. Из рис. 2.80, в следует, что при обкатывании ($P = 50$ Н) шаром с увеличением диаметра $d_{\text{ш}}$ с 4 до 19 мм величина HV снижается с 90 до 74.

Алмазное выравнивание закаленной стали У10 алмазным сферическим наконечником ($D_3 = 12$ мм; $r_c = 1.5$ мм; $P = 200$ Н) приводит к повышению поверхностной твердости HV с исходного значения 762 до 803.

По данным В.М. Торбило, после алмазного выравнивания закаленной стали 40Х (твердость 57 HRC) наконечником сферической формы с радиусом $r_c = 1$ мм в поверхностном слое создаются сжимающие остаточные напряжения, равные 500...1100 МПа, глубина

залегания напряжений с изменением силы выглаживания P от 50 до 200 Н изменяется от 0,15 до 0,40 мм. После выглаживания сталей 40Х и 35ХНМ создаются сжимающие остаточные напряжения: тангенциальные, равные 150...250 МПа, и нормальные, равные 350...450 МПа. Глубина их залегания равна 0,15...0,40 мм. Максимальные тангенциальные напряжения находятся на некоторой глубине, нормальные напряжения имеют максимум у поверхности и постепенно уменьшаются при удалении от поверхности. На глубине свыше 0,1 мм нормальные и тангенциальные остаточные напряжения становятся практически равными. При алмазном выглаживании закаленной стали ШХ15 наконечником цилиндрической формы максимальные тангенциальные напряжения находятся у поверхности детали и распространяются на глубину 0,15...0,20 мм, что значительно меньше, чем при выглаживании этой стали сферическим наконечником.

Напряжения в подповерхностном слое зависят от параметров режима обработки поверхностей ППД. На рис. 2.81, *а* показана зависимость напряженного состояния поверхностного слоя закаленной стали 45 с твердостью 55 HRC от силы P выглаживания. Значения максимальных остаточных напряжений $\sigma_{\max}$ и глубина их залегания $h_{\sigma_{\max}}$, а также глубина распространения остаточных сжимающих напряжений h_{σ} возрастают с увеличением силы P . С уменьшением подачи S инструмента (рис. 2.81, *б*) значения показателей напряженного состояния подповерхностного слоя возрастают, но с меньшей интенсивностью, чем при увеличении силы P .

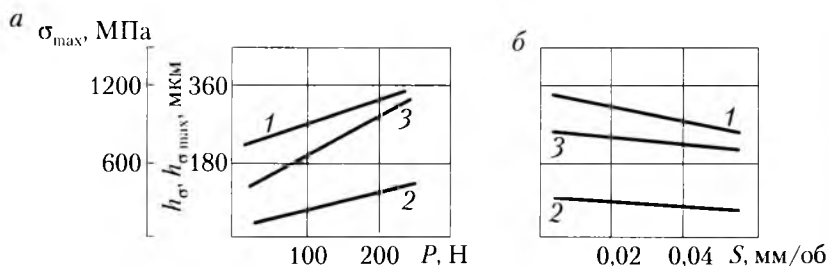


Рис. 2.81. Влияние силы P (*а*) и подачи S (*б*) при алмазном выглаживании на показатели напряженного состояния подповерхностного слоя металла: 1 — максимальные остаточные напряжения $\sigma_{\max}$; 2 — глубину $h_{\sigma_{\max}}$ залегания; 3 — глубину распространения остаточных напряжений h_{σ}

С увеличением числа проходов инструмента с 1 до 8 происходит небольшое увеличение показателей напряженного состояния подповерхностного слоя металла при алмазном выглаживании. Величина поверхностных напряжений несколько снижается с увеличением скорости обработки. Подобные результаты получены для закаленных сталей ШХ15, 40Х, 12Х18Н9Т и др. Обычно максимум тангенциальных напряжений располагается на глубине 0,03...0,10 мм. Общая толщина упрочненного подповерхностного слоя металла при ППД достигает 0,45 мм.

Исследования зависимостей степени упрочнения (рис. 2.82, кривые 1, 2) и толщины упрочненного слоя по микротвердости (кривые 3, 4) при накатывании (кривые 1, 3) и вибронакатывании (кривые 2, 4) шаром от силы P и размера инструмента $d_{\text{ш}}$ производились на плоских образцах из сплава ВТЗ-1. Приведенные результаты исследований свидетельствуют о том, что наибольшая степень деформационного упрочнения имеет место при обработке металла ППД с большими силами P и шарами меньшего диаметра $d_{\text{ш}}$. Эти результаты показывают также, что при принятых условиях обработки ($P = 100...600$ Н; $d_{\text{ш}} = 3,2...19$ мм) накатыванием и вибронакатыванием толщина слоя упрочненного металла не превышает 0,03 мм.

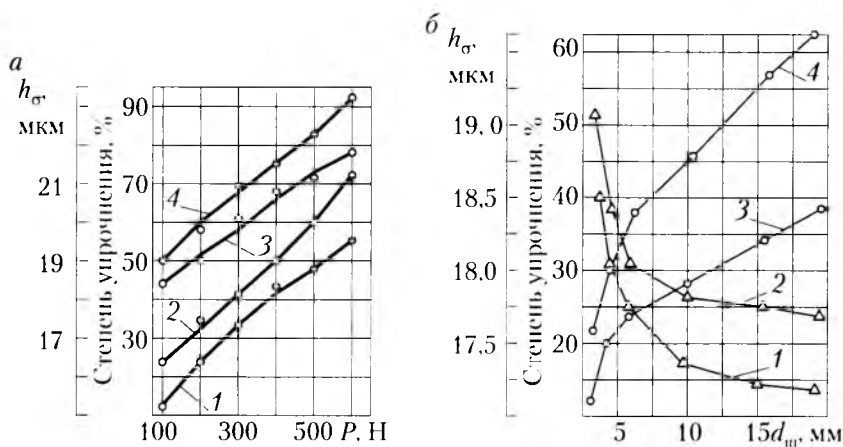


Рис. 2.82. Зависимости степени упрочнения и толщины упрочненного слоя от силы обкатывания (а) и размера инструмента (б)

Приведенные на рис. 2.83 кривые, характеризующие распределение микротвердости по толщине подповерхностного слоя металла, идентичны. Обработанные ППД образцы имеют более высокую микротвердость подповерхностного слоя металла по сравнению с образцами, обработанными резанием. Если микротвердость обточенных образцов на глубине 2 мкм от поверхности составляет 256, а шлифованных 277, то микротвердость накатанных и вибро-накатанных ($P = 300$ Н, $d_{\text{ш}} = 15$ мм) образцов составляет соответственно 308 и 324, или на 20 и 27 % больше по сравнению с микротвердостью обточенных образцов. С увеличением силы обработки до 600 Н микротвердость накатанных и вибронакатанных образцов возрастает соответственно до 359 и 397.

С применением ППД толщина упрочненного подповерхностного слоя по микротвердости достигает 28,3 мкм при обработке бронзы БрО8С12 и 282 мкм при обработке алюминиевого сплава АК-9 (АЛ4), а степень упрочнения — соответственно 57,1 и 64 % [5, 9].

Эффективность применения комбинированной обработки ППД можно проследить на примере плунжеров топливных насосов из закаленных сталей ХВГ и У10А (твердость 62...65 HRC). Испытание плунжеров на износостойкость проводилось в паре с гильзами из закаленной стали 45. Отобранные для испытания плунжеры были разбиты по обработке рабочих поверхностей диаметром 12 мм на 4 группы. Плунжеры 1-й группы были обработаны доводкой; 2-й — выглаживанием алмазным наконечником ($r_c = 1,5$ мм; $P = 200$ Н; $n_3 = 2000$ мин⁻¹; $S = 0,02$ мм/об); 3-й — вибровыглаживанием

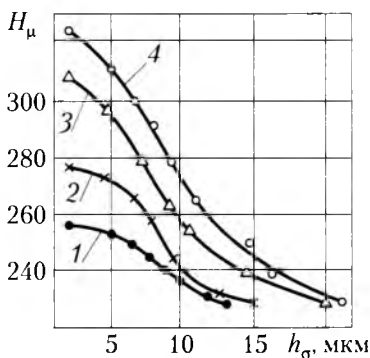


Рис. 2.83. Изменение микротвердости по толщине упрочненного слоя сплава ВТ1-1 при обработке: 1 — точением; 2 — шлифованием; 3 — накатыванием; 4 — вибронакатыванием ($P = 300$ Н; $d_{\text{ш}} = 15$ мм; $n_{\text{в.х}} = 2900$ 1/мин; $2A = 2$ мм)

алмазным наконечником ($r_c = 1,5$ мм; $P = 550...700$ Н; $n_3 = 120...170$ мин⁻¹; $S = 2$ мм/об; $n_{\text{в.х}} = 2800$ мин⁻¹; $2A = 1,6...1,8$ мм); 4-й — вибровыглаживанием в режиме создания ЧРМР с $F_{\text{н}} = 64...73$ % (глубина канавок $h = 1,5...3$ мкм) с последующим выглаживанием алмазным наконечником (комбинированная обработка осуществлялась с параметрами режима, указанными для групп 2 и 3).

Указанная комбинированная обработка плунжеров обеспечивает шероховатость рабочих поверхностей с $Ra = 0,025...0,1$ мкм ($Ra_{\text{исх}} = 0,2...0,4$ мкм) и исключает доводку пастами. При ППД уменьшение диаметра плунжеров не превышает 0,3 мкм, точность их геометрической формы сохраняется, поверхностная твердость HRC возрастает на единицы (с 762 до 803 HV). За критерии изнашивания приняты массовый (мг) и размерный (мкм) износы И плунжеров. Из рис. 2.84 следует, что износ плунжеров 1-й группы составляет 1,38 мг по массе и 1,2 мкм по размеру; 2-й — соответственно 1,02 мг и 0,8 мкм; 3-й — 0,88 мг и 0,7 мкм и 4-й группы — 0,8 мг и 0,6 мкм. Износостойкость плунжеров с комбинированной обработкой ППД (4-я группа) возрастает по сравнению с 1-й группой в 1,73 раза по массе и в 2 раза по размеру; со 2-й группой соответственно в 1,28 и 1,33 раза; с 3-й группой — в 1,1 раза и 1,16 раза.

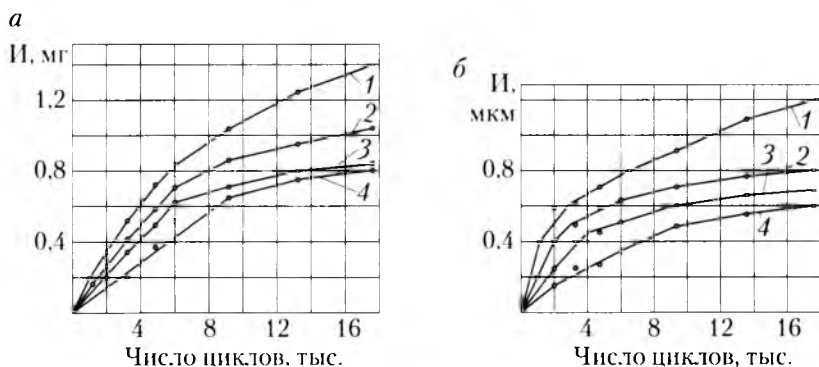


Рис. 2.84. Зависимость износа плунжеров по массе (а) и размеру (б) от продолжительности работы при обработке рабочих поверхностей: 1 — доводкой; 2 — алмазным выглаживанием; 3 — доводкой и вибровыглаживанием; 4 — алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием

Производительность комбинированной обработки ППД на 25...45 % выше, чем при обработке доводкой.

В другой серии экспериментов, выполненных совместно с Ю.И. Мулиным, исследовалось изнашивание калибров, рабочие поверхности которых обрабатывались доводкой по типовой технологии; доводкой и алмазным выглаживанием; доводкой и вибровыглаживанием; тонким шлифованием, алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием; доводкой, алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. Испытывались калибры-пробки диаметром 16 мм четырех групп из следующих материалов: стали У10А, стали Х, стали с хромовым покрытием и твердого сплава ВК6М. Испытание проводилось на специальном стенде в условиях, близких к реальным условиям работы калибров. Рабочие поверхности имели шероховатость с $Ra_{cp} = 0,025...0,1$ мкм. В каждой из четырех групп испытуемых калибров наибольшую износостойкость имели калибры, обработанные комбинированной обработкой ППД (табл. 2.16)

Таблица 2.16

Относительный износ калибров с различной комбинированной обработкой рабочих поверхностей

Способ комбинированной обработки	Материал калибров			
	Сталь У10А	Сталь ХВГ	Сталь с хромовым покрытием	Твердый сплав ВК6М
Доводка	1.00	1.00	1.00	1.00
Тонкое шлифование, алмазное выглаживание	1.55	—	—	—
Доводка, алмазное выглаживание	1.60	—	1.47	1.07
Доводка, вибровыглаживание	1.76	—	1.55	1.30
Тонкое шлифование, вибровыглаживание	2.21	—	—	—
Доводка, алмазное выглаживание, вибровыглаживание	2.23	2.17	1.86	1.33

Приведенное повышение износостойкости стальных калибров и калибров с хромовым покрытием можно объяснить действием таких факторов, как некоторое упрочнение подповерхностного слоя материала алмазным выглаживанием, характеризующимся увеличением микротвердости на 14 %; образование на рабочих поверхностях

вибровыглаживанием канавок, являющихся масляными «карманами» и «ловушками», обеспечивающими локализацию продуктов изнашивания в результате западания в них абразивных, металлических и других частиц, вызывающих ускоренный износ трущихся поверхностей; повышение на 25 % микротвердости в местах приканавочных наплывов при вибровыглаживании (сами приканавочные наплывы снимаются подводкой или выглаживанием); отсутствие ПН и создание пологих выступов со средним радиусом скругления вершин в поперечном направлении до 2000 мкм. Повышение износостойкости калибров из твердого сплава ВК6М достигается только оптимизацией микрогеометрии рабочей поверхности.

Результаты лабораторных исследований соответствуют данным промышленных испытаний, выполненных на карбюраторном заводе, в оптико-механическом объединении (Санкт-Петербург), других организациях. Комбинированная обработка ППД оказалась оправданной не только технически, но и экономически. Так, годовой экономический эффект от использования технологического процесса комбинированной обработки рабочих поверхностей калибров ППД в ОМО составляет сумму, эквивалентную 5590 у.е. Экономический эффект при использовании комбинированной обработки калибров ППД обеспечивается за счет ликвидации операции доводки и уменьшения количества потребляемого объединения инструмента. В результате выполненных исследований создан новый измерительный калибр (А.с. СССР 297852).

Увеличение микротвердости, обеспечиваемое отделочно-упрочняющей обработкой ППД, не всегда оказывается достаточным для многих условий эксплуатации прецизионных деталей, например из титановых сплавов. Как показали проведенные исследования [4, 7, 9], значительное увеличение микротвердости титановых сплавов может достигаться применением химико-термической обработки, что особенно важно для термически неупрочняемых (ВТ1-1 и ВТ5). Установлено, что наиболее перспективными для титановых сплавов процессами химико-термической обработки для промышленного применения являются оксидирование (особенно вакуумное), азотирование и диффузионное насыщение подповерхностного слоя титановых сплавов ферромарганцем.

Оксидирование может производиться в воздушной атмосфере и в вакууме с остаточным давлением 0,14 Па при температуре 1003...1073 К с выдержкой 1...2 ч. Близкие параметры режима об-

работки позволяют совместить вакуумное оксидирование с термостабилизирующим отжигом в вакууме, что устраняет необходимость введения отдельной операции оксидирования заготовок из титановых сплавов [9].

Азотирование может осуществляться в потоке очищенного азота при нормальном давлении, температуре 1193 К с выдержкой 2,5 ч. Для рассасывания нитридной корочки возможно применение диффузионного отжига в аргоне при той же температуре с выдержкой 3 ч. Диффузионное насыщение ферромарганцем может производиться в насыщающей смеси, состоящей из одного объема ферромарганца (МН-6, ГОСТ 4755–91), двух объемов Al_2O_3 и трех массовых процентов NaF при температуре 1153 К в течение 10 ч.

По сравнению с исходным состоянием ($229 H_{\text{мисх}}$) микротвердость титанового сплава DN1-1 возрастает в 6,5 раза при азотировании и в 8,5 раза при диффузионном насыщении ферромарганцем. Значительно повышается микротвердость и при оксидировании. Так, при вакуумном оксидировании сплава BT1-1 микротвердость подповерхностного слоя глубиной до 0,02 мм, измеренная на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 2 Н, повышается с исходного значения до 644, или в 2,8 раза больше [7, 9].

Требование повысить микротвердость подповерхностного слоя металла для улучшения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей должно согласовываться с возможным изменением механических свойств титановых сплавов при применении различных способов обработки. Исследование влияния химико-термической обработки на механические свойства (предел прочности σ_b и относительное удлинение δ) проводилось на цилиндрических образцах из сплава BT1-1 диаметром 1,45 мм. Выбор образцов обоснован тем, что на образцах малого сечения более рельефно отражается влияние подповерхностного слоя с повышенной твердостью. В результате проведенных исследований установлено, что как азотирование, так и диффузионное насыщение ферромарганцем, а также оксидирование в воздушной среде приводят к значительному охрупчиванию сплава. Насыщение, например ферромарганцем, приводит практически к полной потере пластичности сплава BT1-1.

Хорошие результаты получены при вакуумном оксидировании титановых сплавов (температура 1013 К, выдержка 2 ч). Этот про-

цесс не оказывает ощутимого влияния на предел прочности сплава ВТ1-1 ($\sigma_{исх} = 372$ МПа, после оксидирования $\sigma_{в} = 373$ МПа) и сохраняет достаточно высокое значение относительного удлинения ($\delta_{исх} = 32$ %, после оксидирования $\delta = 30,3$ %). Подобные результаты получены и для сплава ВТ5.

Положительное влияние на эксплуатационные свойства прецизионных деталей и соединений оказывает также комбинированная обработка ППД с последующим сульфидированием.

Для повышения производительности обработки заготовок все большее распространение получает совмещенная обработка, позволяющая совместить в один процесс резание и последующее ППД (точение, накатывание или алмазное выглаживание, виброточение и вибронакатывание с помощью, например, виброустановки ВУ-2), опережающее ППД и резание и другие способы совмещенной обработки. Для совмещенной обработки в системе оснастки для ППД предусмотрены приспособления, примерами которых могут служить устройства, приведенные на рис. 2.55–2.58.

2.3.11. Расчет параметров режима обработки и инструмента

Сила P поджима инструмента к поверхности при накатывании, алмазном выглаживании, вибронакатывании и вибровыглаживании в режиме создания ПРМР инструментом сферической формы может определяться по формуле [6, 9]

$$P = K_p \left(\frac{D_3 d_{ш}}{D_3 + d_{ш}} \right)^2,$$

где K_p — коэффициент силы, МПа (принимается по табл. 2.17); $d_{ш}$ — диаметр шара и сферы алмазного наконечника, мм.

При накатывании и вибронакатывании роликами в режиме создания ПРМР сила P определяется по формуле

$$P = K_p \left(\frac{D_3 r_p}{D_3 + 2r_p} \right)^2 \sqrt{\frac{d_p}{r_p}},$$

где K_p — коэффициент силы, МПа (принимается по табл. 2.18, 2.19).

Таблица 2.17

Значения коэффициента K_p при обработке труднообрабатываемых материалов инструментом сферической формы

Материал	Наружные цилиндрические поверхности, обрабатываемые		Плоские поверхности, обрабатываемые		Внутренние цилиндрические поверхности, обрабатываемые	
	обкатыванием и выглаживанием	виброобкатыванием и вибронакатыванием	накатыванием и выглаживанием	вибронакатыванием и вибронакатыванием	раскатыванием и выглаживанием	вибраскатыванием и вибронакатыванием
Стали:						
12X18H10T	4,3	2,7	4,5	2,8	4,6	2,9
45	4,4	2,9	4,6	3,0	4,7	3,1
Сплавы титановые:						
BT1-1	4,5	3,0	4,7	3,2	4,9	3,3
BT3-1	6,2	4,2	6,5	4,3	6,8	4,4
BT5	5,4	3,6	5,7	3,8	5,9	4,0
BT6	5,8	3,9	6,1	4,0	6,3	4,2
Сплав никелевый ХН67ВМТЮ	6,0	4,0	6,2	4,2	6,4	4,3

Примечание. Для других вязкопластичных материалов значение K_p в табл. 2.17–2.19 принимается пропорционально изменению твердости относительно величины K_p представителя данной группы (для сталей — 12X18H9T; для титановых сплавов — BT1-1; для никелевых сплавов — ХН67ВМТЮ).

При вибронакатывании с образованием ЧРМР сила P определяется по выражениям:

- для обработки инструментом сферической формы

$$P = \left(\frac{hd_{\text{ш}}^{0,809} D_3^{0,329}}{12,352 K_{\text{но}}^{0,723}} \right)^{1,389};$$

- для обработки профильными роликами

$$P = \left(\frac{hr_p^{0,8} D_3^{0,3}}{14,706 K_{\text{но}}^{0,81}} \right)^{1,4} \sqrt{\frac{d_p}{r_p}},$$

где h — глубина канавки (задается из условий эксплуатации деталей от 0,001 до 0,01 и более), мм; $K_{\text{но}}$ — коэффициент обрабатываемости материала относительно сплава ВТ1-1 принимается по табл. 2.2.

Таблица 2.18

**Значение коэффициента K_p при обработке роликами
с постоянными параметрами**

Материал	Гладкие ролики при обработке			Профильные синусоидальные ролики при обработке		
	наружных цилиндрических поверхностей	плоских поверхностей	внутренних цилиндрических поверхностей	наружных цилиндрических поверхностей	плоских поверхностей	внутренних цилиндрических поверхностей
Стали:						
12Х18Н10Т	8,5	8,7	8,9	7,9	8,0	8,2
45	8,9	9,6	9,4	8,3	8,5	9,8
Сплавы титановые:						
ВТ1-1	9,1	9,4	9,6	8,5	8,9	9,3
ВТ3-1	12,4	12,6	12,9	11,8	12,1	12,4
ВТ5	11,0	11,3	11,5	10,2	10,7	11,3
ВТ6	11,5	11,9	12,4	11,0	11,6	12,0
Сплав никелевый ХН67ВМТЮ	12,1	12,3	12,6	11,4	11,8	12,1

Таблица 2.19

**Значение коэффициента K_p при обработке роликами
с переменными параметрами**

Материал	Профильные синусоидальные ролики при обработке			Профильные косинусоидальные ролики при обработке		
	наружных цилиндрических поверхностей	плоских поверхностей	внутренних цилиндрических поверхностей	наружных цилиндрических поверхностей	плоских поверхностей	внутренних цилиндрических поверхностей
Стали:						
12Х18Н10Т	6,7	6,8	7,0	5,6	5,7	5,9
45	7,1	7,4	7,6	5,8	6,1	6,5

Окончание табл. 2.19

Материал	Профильные синусоидальные ролики при обработке			Профильные косинусоидальные ролики при обработке		
	наружных цилиндрических поверхностей	плоских поверхностей	внутренних цилиндрических поверхностей	наружных цилиндрических поверхностей	плоских поверхностей	внутренних цилиндрических поверхностей
Сплавы титановые:						
BT1-1	7,2	7,6	7,9	5,9	6,3	6,6
BT3-1	10,1	10,4	10,6	8,3	8,5	8,7
BT5	8,6	9,0	9,6	7,4	7,9	8,3
BT6	9,4	9,8	10,2	7,7	8,8	8,4
Сплав никелевый ХН67ВМТЮ	9,7	10,1	10,3	8,0	8,2	8,5

При накатывании (выглаживании) и вибронакатывании (вибровыглаживании) в режиме создания ПРМР подача S (мм/об) может определяться из выражений [9, 20]:

□ для обработки инструментом сферической формы

$$S = 0,8\sqrt{d_{\text{ш}} Rz} = 1,8\sqrt{d_{\text{ш}} Ra};$$

□ для обработки роликами

$$S = 2,83\sqrt{r_p Rz} = 6,33\sqrt{r_p Ra},$$

где $d_{\text{ш}}$ — диаметр шара и сферы алмазного наконечника, мм; r_p — радиус скругления ролика, мм.

При вибронакатывании и вибровыглаживании инструментом сферической формы подача S может определяться по формуле [9, 20]

$$S = \frac{2\rho_k}{0,03F_u} \left[2 + \sqrt{1 + \left(\frac{2Ai}{D_s} \right)^2} \right]$$

или назначаться из условий: для ЧРМР вида 3

$$S > 2(\rho_k + A \sin \pi i_0);$$

для ЧРМР вида 4

$$S > 2A \sin \pi i_0;$$

для ЧРМР вида 5

$$S > 2\rho_k (A - \sin \pi i_0);$$

здесь $\rho_k = b_k/2$.

При вибронакатывании профильными роликами в режиме создания ЧРМР подачу следует принимать из соотношений [9, 20]:

для ЧРМР вида 3

$$S \geq b_k,$$

когда отношение D_3/d_p является целым числом, и

$$S \geq 2A + b_k,$$

когда отношение D_3/d_p не является целым числом; для ЧРМР вида 4

$$2A - b_k < S < 2A + b_k;$$

для ЧРМР вида 5

$$b_k < S < 2A - b_k.$$

Скорость v можно принимать при обработке труднообрабатываемых материалов инструментом сферической формы 80...300 м/мин, роликами — 75...125 м/мин. Параметры вибронакатывания и размер сферы инструмента i , A , d_{III} можно рассчитать по формулам (9, 20]

$$i = \frac{0,33D_3}{\rho_k A} \sqrt{0,03S^2 F_H^2 - 0,08SF_H + 4\rho_k},$$

$$A = \frac{0,33D_3}{\rho_k i} \sqrt{0,03S^2 F_H^2 - 0,08SF_H + 4\rho_k},$$

$$d_{III} = \frac{0,023F_H D_3 (2D_3 - \sqrt{D_3^2 + 4A^2 i^2})^2}{4h(4A^2 i^2 - 3D_3^2)^2}.$$

Рациональные параметры вибросверления направлены на повышение производительности обработки и стойкости вибросверл. Как показали исследования, стойкость вибросверл при сверлении

без вибрации инструмента сплава ХН67ВМТЮ составляет 14...19 мин, при сверлении титанового сплава ВТЗ-1 — 21...28 мин. При вибросверлении никелевого сплава ХН67ВМТЮ стойкость вибросверл составляет 21...26 мин, при вибросверлении титанового сплава ВТЗ-1 — 36...42 мин. Стойкость спиральных сверл из твердого сплава ВК8 составила для сплава ХН67ВМТЮ — 10...14 мин, для сплава ВТЗ-1 — 18...25 мин (при $v = 20...25$ м/мин). Стойкость же спиральных сверл из стали Р6М5 соответствовала: для сплава ХН67ВМТЮ — 3...6 мин, для сплава ВТЗ-1 — 8...12 мин при скорости резания 8 м/мин, так как при большей скорости резания стойкость стальных спиральных сверл резко уменьшается.

При сверлении спиральными сверлами СОЖ в зону резания подавалась поливом. Исследованиями установлено, что подача СОЖ в зону резания под давлением несколько увеличивает стойкость вибросверл при сверлении без вибрации инструмента по сравнению с твердосплавными спиральными сверлами. Совместное влияние подачи СОЖ под давлением и вибрации инструмента приводит к повышению стойкости специальных сверл при обработке труднообрабатываемых материалов примерно в 2 раза.

Уместно отметить, что при сверлении специальными сверлами без вибрации инструмента с целью удаления скапливающейся в прямолинейных каналах стружки в процессе сверления необходимо периодически выводить инструмент из обрабатываемого отверстия, что снижает не только производительность обработки, но и качество обработанной поверхности. Так, при сверлении сплава ВТЗ-1 количество выводов сверла при длине отверстия 50 мм должно быть не менее 10–15. В целом производительность обработки отверстий в вязкопластичных материалах вибросверлением по сравнению с обычным сверлением возрастает в 2–3 раза.

С внедрением вибросверления снижаются также затраты на инструмент. В табл. 2.20 представлены затраты на инструмент при обработке отверстий диаметром 3 мм и длиной (глубиной) 50 мм в заготовках из сплава ХН67ВМТЮ сверлением спиральными стальными и твердосплавными сверлами и вибросверлением специальными вибросверлами [5, 6, 9].

Приведенные данные по стойкости сверл при обработке вязкопластичных материалов позволяют осуществлять аналитический

расчет параметров режима обработки обычным сверлением, по которым с использованием изложенных ниже соотношений можно назначать параметры вибросверления.

Таблица 2.20

Затраты на инструмент в себестоимости одной детали при сверлении отверстий различными сверлами, у.е.

Инструмент	Стоимость инструмента	Затраты на инструмент при сверлении одного отверстия ($d = 3$ мм, $l = 50$ мм)
Спиральное сверло из стали Р6М5	0,72	1,200
Спиральное сверло из твердого сплава ВК6 с удлинением	8,80	0,210
Вибросверло, армированное твердым сплавом ВК6	12,18	0,105

При вибросверлении отверстий в заготовках из вязкопластичных материалов для получения мелкодробленой стружки рекомендуется принимать $f_v = 75...90$ Гц и обеспечивать величину A — от $0,5S$ до $2S$. Выявлено, что стойкость режущего инструмента максимальна при $2A$, составляющей $(1,0...1,2)S$. Оптимальные условия снятия основного объема срезаемого металла при виброрезании обеспечивается при $i_o = 1/8...1/4$. В табл. 2.21 приведены рекомендуемые скорости резания при вибросверлении некоторых вязкопластичных (труднообрабатываемых) сталей, никелевых и титановых сплавов [5, 9].

Таблица 2.21

Рекомендуемые скорости вибросверления, м/мин

Марки сталей и сплавов	Скорость резания v
Стали 15X18H12C4ТЮ, X25H16Г7АР	25...30
Никелевые сплавы:	
ХН67ВМТЮ, ХН75МВЮ	18...222
ХН67МВКЮ	15...18
Титановые сплавы:	
ОТ4	25...35
ВТ14	20...30

Для вибросверления отверстий диаметром до 10 мм и глубиной до 200 мм можно рекомендовать следующее [4, 6]:

□ скорость резания назначать близкого или несколько большего значения относительно скорости резания при обычном сверлении; если имеются рекомендации для работы сверлами из быстрорежущей стали, а вибросверление предполагается производить вибросверлами с пластинками твердого сплава ВК8, то скорость резания следует увеличить в 3–4 раза;

□ подачу устанавливать в 1,2–1,5 раза большей, чем при обычном сверлении;

□ значение отношения i принимать равной $17/8$ или $19/8$ при частоте вращения заготовки свыше 1000 мин^{-1} ;

□ частоту вибрации сверла определять из соотношения

$$\frac{f_{\text{в}}}{n_3} = \frac{i}{30};$$

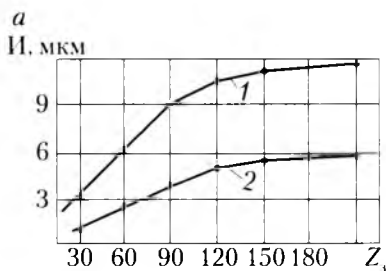


Рис 2.85. Зависимость износа И от числа Z , обработанных отверстий (а), параметры дорнов и режима дорнования (б); h_v — упругая деформация металла; z_0 — остаточная деформация; P_T — сила проталкивания дорна через отверстие); кривая 1 — без сульфидирования; кривая 2 — с сульфидированием

□ амплитуду вибрации $2A$ для сверления отверстий глубиной 5–8 диаметров выбирать в пределах от S до $2S$, для отверстий глубиной более 8 диаметров — от $2S$ до $4S$.

Результаты стойкостных испытаний хромированных дорнов (см. рис. 2.41, *u*) с сульфидированием приведены на рис. 2.85, *a*. При расчете параметров режима дорнования одновременно рассчитывается и инструмент [6, 9]. Углы заборного и обратного конусов дорнов (см. рис. 2.88, *ж-и*; 2.67) следует принимать $\theta_1 = 4...6^\circ$; $\theta_2 = 2...6^\circ$.

Диаметр d_n рабочего пояса дорна (рис. 2.85, *б*) определяется по формуле

$$d_n = D_{\min} i_a,$$

где $D_{\min}$ — наименьшее значение диаметра отверстия детали по чертежу, мм; i_a — абсолютный натяг, мм,

$$i_a = \lambda_o D_3,$$

здесь λ_o — относительный натяг; D_3 — диаметр отверстия заготовки перед дорнованием, мм.

Значение λ_o зависит от отношения наружного диаметра D_n и диаметра отверстия заготовки D_3 и выбирается по табл. 2.22 [6].

Таблица 2.22

Значения относительного натяга для различных условий дорнования

Способ обработки отверстий перед дорнованием	Значения Ra поверхности перед дорнованием, мкм	Рациональный относительный натяг при D_n/D_3		
		Менее 1.4	1.4...2.0	Более 2.0
Протягивание	0.6...2.5	0.0043...0.0050	0.0032...0.0038	0.0028...0.0032
Развертывание	1.2...2.2	0.0050...0.0065	0.0040...0.0055	0.0032...0.0040
Шлифование	0.6...2.4	0.0050...0.0065	0.0040...0.0055	0.0032...0.0042
Растачивание	1.0...1.8	0.0063...0.0084	0.0055...0.0070	0.0054...0.0060
Вибросверление	0.5...2.4	0.0065...0.0086	0.0058...0.0073	0.0056...0.0075

Натяг можно определять и другим путем. Так, при дорновании заготовок из легированных сталей

$$i_{a\max} = T + K_{жz_T} Rz, \quad i_{a\max} = K_{жz_T} Rz,$$

где T — допуск на диаметр отверстия детали; $K_{ж}$ — коэффициент, учитывающий жесткость заготовки; z_T — коэффициент, учитывающий твердость обрабатываемого материала.

В зависимости от отношения D_{II}/D_3 значение коэффициента $K_{ж}$ принимается равным:

- $D_{II}/D_3 > 3,3 - K_{ж} = 3,5;$
- $D_{II}/D_3 = 2,0...3,3 - K_{ж} = 5;$
- $D_{II}/D_3 = 2 - K_{ж} = 6.$

В зависимости от твердости HV значение коэффициента z_T можно принимать равным:

- HV = 278...384 — $z_T = 1,2;$
- HV = 166...272 — $z_T = 1,0;$
- HV = 131...168 — $z_T = 0,85;$
- HV = 131 — $z_T = 0,7.$

Допуск изготовления дорна по диаметру может приниматься равным $\pm 1/8$ допуска на дорнуемое отверстие. Ширина цилиндрической ленточки дорна $b_{\perp} = \frac{1}{13} d_{II} + 0,3$ мм. Диаметр отверстия под дорнование $D_3 = (d_{II} - i_a) - 0,007$ мм [6, 9].

Допуск на диаметр отверстия перед дорнованием должен быть в пределах качества точности 10 для отверстий по качеству 7 и в пределах качества 8 для отверстий по качествам точности 5–6. Скорость дорнования, как правило, составляет 10...60 м/мин.

Отличительные особенности имеет расчет такого нового инструмента, как профильные ролики [4–9]. Расчет их начинается с выбора угла γ наклона следов обработки из условий работы детали в машине. Установлено, что в большинстве случаев для улучшения износостойкости деталей целесообразно принимать $\gamma = 31...35^\circ$, для повышения сопротивления схватыванию — $\gamma \approx 45^\circ$, для обеспечения улучшенных прочностных характеристик — $\gamma = 60...65^\circ$.

По выбранному значению γ (град) и принятому осевому биению $\delta = 2A$ (обычно $2A = 1...10$ мм) определяется длина волны λ (мм):

$$\lambda = \frac{4A}{\operatorname{tg} \gamma}.$$

Для профильных синусоидальных роликов с переменными параметрами λ и $2A$ следует задавать коэффициент краткости z . Например, задано, что оба параметра λ и $2A$ — переменные, тогда гофры в виде синусоид с этими параметрами будут попеременно чередоваться с гофрами в виде синусоид, имеющих параметры $\lambda_1 = \lambda/z$ и $2A_1 = 2A/z$, при этом угол γ следов обработки будет постоянным (см. рис. 2.36, б). Возможен и вариант, когда переменным

задается один из параметров, например λ . Тогда синусоиды с параметрами λ и $2A$ будут попеременно чередоваться с синусоидами, имеющими параметры $\lambda_1 = \lambda/z$ и $2A$, при этом угол γ будет иметь значение γ_1 и γ_2 (см. рис. 2.36, в). В профильных косинусоидальных роликах длина прямых участков обычно равна длине косинусоид λ (см. рис. 2.36, е).

Далее определяется диаметр d_p ролика, мм по формулам:

□ для синусоидального ролика с постоянным значением λ

$$d_p = \frac{\lambda m}{\pi};$$

□ для синусоидального ролика с переменным значением λ

$$d_p = \frac{\lambda + \frac{\lambda}{z}}{\frac{m}{\pi}};$$

□ для косинусоидального ролика

$$d_p = \frac{2\lambda m}{\pi},$$

где λ — длина волны синусоиды (косинусоиды), мм; m — количество синусоид, пар синусоид, косинусоид и прямых участков, укладываемое целое число раз на длине πd_p (значение m принимается по конструктивным соображениям для обеспечения наиболее рационального значения d_p).

Ширина ролика b_p (см. рис. 2.41, з) в месте контакта с осью выбирается конструктивно. Диаметр $d_{ц}$ отверстия ролика под ось (цапфу) определяется из условия отсутствия контактных деформаций смятия в соответствии с принятым значением b_p по формуле

$$d_{ц} = \frac{P}{b_p \sigma_{см}},$$

где P — сила обработки, Н; $\sigma_{см}$ — допускаемое напряжение смятия, МПа (обычно $\sigma_{см} = 15...25$).

Радиус r_p скругления рабочего профиля ролика принимается равным от 1 до 12 мм. Значение r_p зависит от твердости обрабатываемого материала и требований к шероховатости обработанной поверхности. Чем ниже твердость и выше требования к шерохова-

тости по высотным параметрам, тем большее значение может иметь радиус r_p .

Расчет и правильный выбор параметров режима обработки инструмента и СОЖ является необходимым фактором в решении задач повышения качества и обеспечения требуемых эксплуатационных свойств деталей и соединений.

2.3.12. Рекомендации по применению СОЖ

В качестве СОЖ при обработке различных материалов применяются эмульсии (Эм), синтетические (Сн) и масляные (Мл) жидкости [8].

Эмульсии представляют собой дисперсные системы, состоящие из двух жидкостей, нерастворимых или малорастворимых друг в друге. Наиболее широко в настоящее время используются эмульсии типа «масло в воде». Концентраты эмульсии, разбавляемые водой, называются эмульсолами, в состав которых включаются эмульгаторы, активные присадки, ингибиторы коррозии, бактерицидные добавки и другие компоненты. Существуют эмульсолы в виде растворимых масел. Растворы из растворимых масел весьма перспективны, так как они обладают хорошими антикоррозионными свойствами и позволяют (ввиду прозрачности) наблюдать за обработкой.

Синтетические СОЖ могут применяться в виде электролитов, водных растворов солей и поверхностно-активных веществ (ПАВ) и суспензий.

К масляным относятся СОЖ на основе минеральных масел. Масла легируются различными присадками, которые по характеру действия можно разделить на антифрикционные, противоизносные и противозадирные.

При сверлении и вибросверлении находят применение СОЖ всех классов. Из класса Сн используются жидкости (состав в массовых процентах): а — водный раствор АКВ-2ал, состоящий из 0,14 % триэтаноламина, 0,3 % нитрита натрия, 0,6 % мылонафта, до 0,2 % смачивателя ОП-7 (ОП-10), 0,1 % кальцинированной соды и 0,3 % борной кислоты; б — водный раствор ТУН, состоящий из 0,16 % триэтаноламина, 0,3 нитрита натрия и 0,16 % уротропина; в — раствор МОТ-2, состоящий из 0,5 % триэтаноламина, 0,2 % мылонафта и 1,0 % оленовой кислоты; г — 3...10%-ный раствор

состава «Аквол-10» по ТУ 38-2-01-220-75 (изготавливается Дробычским нефтеперерабатывающим заводом).

Из класса Эм применяются (состав в массовых процентах): д — 3...10%-ная эмульсия из эмульсола НГЛ-205 по ТУ 38-1-242-69 (изготавливается Московским опытно-промышленным заводом Научно-исследовательского института нефтяной промышленности — НИИНП); е — 2...10%-ная эмульсия, из эмульсола «Укрикол-1» по ТУ 38-101-197-76 (изготавливается Пермским опытно-промышленным нефтемаслозаводом); ж — 5%-ная эмульсия из эмульсола СМДУ-2 по МРТУ 38.101-546-75 (изготавливается Московским опытно-промышленным заводом НИИНП); з — 3...10%-ная эмульсия из эмульсолов ЭТ-2 и ЭГТ по ТУ 38-1-228-69 и ТУ 38-1-01-149-71 (изготавливается Ростовским опытным нефтемаслозаводом); и — 5...10%-ная эмульсия из эмульсола РЗ-СОЖ8 (изготавливается Ростовским опытным нефтемаслозаводом); к — 5...7%-ная эмульсия из эмульсола Т (изготавливается Ивановским химическим заводом).

Из класса Мл находят применение жидкости: л — масло ОСМ-3 по ТУ 38-2-01-152-73 (изготавливается Московским опытно-промышленным заводом НИИНП); м — масла индустриальные И-12А, И-20А по ГОСТ 20799-88; н — СОЖ МР-1 по ТУ 38-1-01-247-73 (изготавливается Нижегородским опытно-промышленным нефтемаслозаводом); о — СОЖ МР-2 по ТУ 38-2-01-205-75 (изготавливается Бердянским опытным нефтемаслозаводом); п — СОЖ МР-4 по ТУ 38-Т-01-481-76 (изготавливается Нижегородским опытно-промышленным нефтемаслозаводом); р — масло ГЗ-3Х по ТУ 2Г8-1-01-115-75 (изготавливается Нижегородским опытно-промышленным нефтемаслозаводом); с — смесь 92...96 % масла И-12А и 8...4 % оленовой кислоты.

При обработке ППД могут эффективно использоваться лишь СОЖ класса Мл, в том числе, помимо перечисленных выше: т — СОЖ В-31 по 38-1-01-89-70 (выпускается Пермским опытно-промышленным нефтемаслозаводом), у — ЛЗ СОЖ 2СО по ТУ 38-1-01-115-75 (изготавливается Санкт-Петербургским нефтемаслозаводом).

При сверлении отверстий СОЖ подается поливом, а при вибросверлении — под давлением до 12,5 МПа по внутренним каналам вибросверла. При обработке ППД СОЖ наносится на поверхность заготовки распылением кисточкой либо поливом (при дорновании).

Обобщенные рекомендации по применению СОЖ для различных способов обработки и материалов приведены в табл. 2.23, где СОЖ представлены указанными выше буквами.

Таблица 2.23

Рекомендуемые СОЖ

Способы обработки	Класс СОЖ	Обрабатываемый материал					
		Конструкционные углеродистые и легированные стали	Высоколегированные стали специального назначения	Титан и его сплавы	Медь и ее сплавы	Алюминий и его сплавы	Чугуны
Сверление и вибросверление	Сн Эм Мл	а, б, в, г д, е, ж, з, к л, м, н, о, п	г, д, е, ж, з, л, н, о, р	г, п, п, т	г, д, е, з, к м, о, т	г, д, е, з, к, о, т, с	д, е л, у
Накатывание и вибронакатывание	Мл	м, т, о	м, р	м, о	м, т	м	м
Выглаживание и вибровыглаживание	Мл	м, о	м, о	м, у	м, т	м, п	м, р
Дорирование и выглаживающее протягивание	Мл	н, т	н, т	н, у	н, о	н, т	н, о

2.4. Улучшение и исследование эксплуатационных свойств изделий машино- и приборостроения



2.4.1. Влияние регуляризации микрогеометрии поверхностей и упрочнения материалов на свойства деталей и пар

Регуляризация микрогеометрии поверхностей конкретных деталей должна осуществляться поэтапно. Для примера в табл. 2.24 представлены этапы обеспечения параметров ЧРМР некоторых тяжело нагруженных деталей двигателей внутреннего сгорания [6, 15]. На 1-м этапе анализируются условия работы пар трения.

Таблица 2.24
Этапы обеспечения параметров ЧРМР тяжело нагруженных деталей двигателей внутреннего сгорания

Этап	Характеристики	Втулка головки шатуна	Подшипник двигателя мод. 5ТДФ	Подшипник двигателя мод. 6ТДФ	Поршень	Гильза цилиндра	Корпус насоса	Корпус толкателя
1	Условия работы нар:							
	температура, °С	150	100	150	100...150	150...200	200	150
	давление, ГПа	50	5	6	0,5	0,5...1,0	0,5...1,0	0,5
	средняя скорость, м/с	—	70	80	10	—	—	—
2	частота измерения направления в 1 с	46	—	—	46	46	1...2	2...3
	Поверхности и материалы:							
	диаметр, мм	58	56	56	120	120	48	50
	длина, мм	45	42	36	75	300	45	70
	материал	Сталь ШХ15	Алюминиевый сплав АЗ5	Алюминиевый сплав АК4-1	Алюминиевый сплав АК4	Сталь с азотированием 38ХМЮА	Сталь 40	Алюминиевый сплав АК4
	твердость	59...63 HRC	90...100 HB	120...140 HB	100...130 HB	59...61 HRC	500 HB	120...140 HB
	Ra, мкм	0,16	0,32	0,63	0,63	0,1	1,25	

Окончание табл. 2.24

Этап	Характеристики	Втулка головки шатуна	Подшипник двигателя мод. 5ТДФ	Подшипник двигателя мод. 6ТДФ	Поршень	Гильза цилиндра	Корпус насоса	Корпус толкателя
3	Параметры режима ПНД:							
	сила P , Н	300	80	220	100	300	200	100
	радиус инструмента r_c , мм	0,1	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
	подача S , мм/об	0,34	0,87	0,87	0,78	0,87	1,56	0,87
	частота вращения n , мин ⁻¹	25	25	25	25	12,5	31,5	31,5
4	амплитуда колебания $2A$, мм	0,5	0,7	0,6	0,5	0,3	0,8	0,8
	число ходов $n_{дв.х}$, мин ⁻¹	1500	1400	1400	1450	1450	1450	1450
	Параметры РМР:							
	вид микрорельефа	5	4	4	4	3	4	4
	глубина канавки h , мкм	7,4	35	70	34	3,5	9	40
	ширина канавки b_k , мкм	0,27	0,42	0,56	0,38	0,18	0,4	0,41
	относительная площадь канавок F_n , %	78	60,5	87,1	73,87	34,7	32,5	51,2
	угол наклона γ	44°30'	50°11'	50°11'	25°01'	46°21'	40°18'	50°30'
	удельный объем $V_{уд}$, мкм	0,41	11,4	24,2	28,5	0,07	12,7	37,4
	количество пятен в квадрате 25 × 25 мм	1130	480	480	119	—	210	370

2-й этап необходим для изучения сведений о рабочих поверхностях и материалах деталей. На 3-м этапе осуществляется расчет и выбор параметров режима вибронакатывания, вибровыглаживания и других способов образования РМР. 4-й этап посвящается расчету и окончательному уточнению параметров РМР. На рис. 2.86, *а, б* показаны поршни двигателя внутреннего сгорания с рекомендованными табл. 2.19 параметрами микрорельефа, реализованного на токарно-винторезном станке с помощью электромеханической виброголовки с алмазным выглаживателем (рис. 2.86, *в*).

Гильзы цилиндров двигателя внутреннего сгорания с ЧРМР в соответствии с табл. 2.24 и процесс их вибораскатывания с помощью виброголовки на токарно-винторезном станке мод. 1К62 показаны на рис. 2.87.

На рис. 2.88 показаны типовые графики экспериментально выявленных зависимостей некоторых эксплуатационных свойств деталей и соединений от различных стандартных (ГОСТ 2789–73, ГОСТ 24773–81) и нестандартных параметров (радиуса округ-

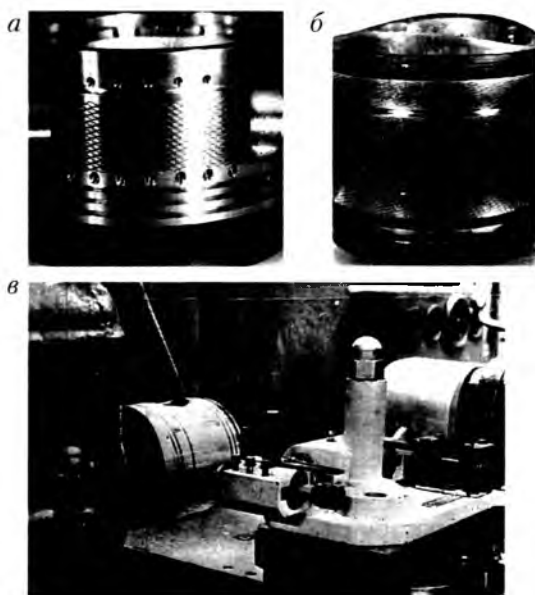


Рис. 2.86. Поршни двигателя внутреннего сгорания (*а, б*), на юбках которых образован ЧРМР, и алмазное вибровыглаживание поршней (*в*)

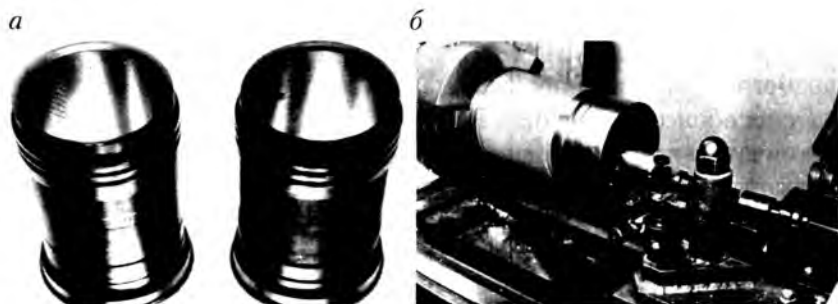


Рис. 2.87. Гильзы цилиндров с РМР на зеркалах (а) и виброраскатывание гильзы на токарно-винторезном станке (б)

ления вершин неровностей r и разновидности поверхности): размерного износа (а), массового износа (б), сопротивления схватыванию (в), противозадирности (г), коэффициента трения скольжения (д), ламинарности перемещения газа в малых зазорах (е), прочности посадок (ж), контактной жесткости (з), коррозионной стойкости (и), теплопроводности контакта (к), гидро- и пневмоплотности (л), усталостной прочности (м), плавности хода (н), коэффициента потерь в волноводах сверхвысоких частот (о), отражения электромагнитных волн (п).

На основе регуляризации микрогеометрии поверхностей и упрочнения подповерхностного слоя материалов достигнуто улучшение многих эксплуатационных свойств изделий (табл. 2.25) [7, 9, 15, 20].

Качество и надежность стальных закаленных (61 HRC) распределителей гидромашин определяется износостойкостью рабочей торцевой прерывистой поверхности. Ранее для обеспечения благоприятных условий смазывания торцевая поверхность после отделочной обработки проходила операцию шабрения (20 точек в квадрате 25 мм) на глубину 2...6 мкм. Этот процесс крайне нестабилен и весьма трудоемок.

Для повышения износостойкости пары блок — распределитель предложена комбинированная обработка рабочей поверхности распределителя ППД, состоящая из алмазного вибровыглаживания и последующего выглаживания торцевой поверхности заготовки детали после термообработки. Вибровыглаживание обеспечивает образование ЧРМР видов 3, 4, 5 (системы канавок), а выглаживание приводит к исключению ПН в виде приканавочных наплывов.

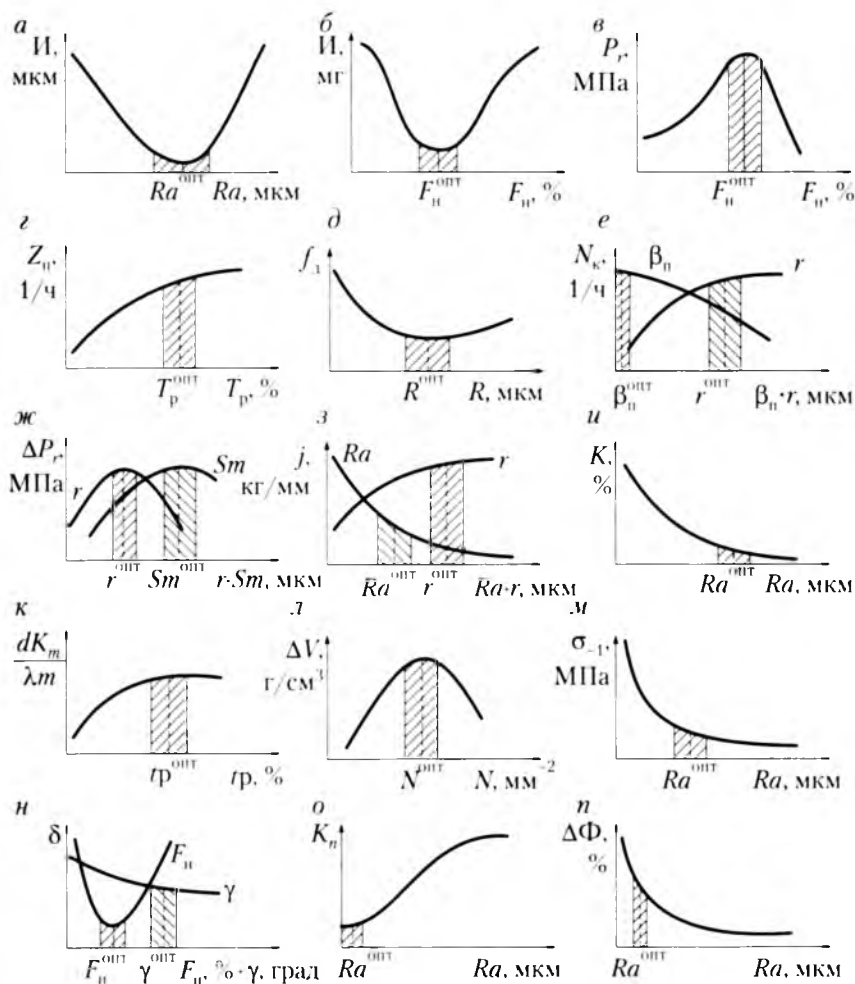


Рис. 2.88. Типовые зависимости ряда эксплуатационных свойств деталей и соединений от различных параметров микрогеометрии и разновидности рабочих поверхностей [7, 20].

Параметры режима комбинированной обработки: вибровыглаживание — $n_3 = 20 \text{ мин}^{-1}$, $S = 1 \text{ мм/об}$, $P = 30 \pm 5 \text{ Н}$, алмазный наконечник с радиусом $r_c = 1,5 \text{ мм}$, $2A = 0,3 \pm 0,05 \text{ мм}$, $n_{\text{дв.х}} = 2800 \text{ мин}^{-1}$, выглаживание — $n_3 = 100 \text{ мин}^{-1}$, $S = 0,055 \text{ мм/об}$, $P = 30 \pm 1 \text{ Н}$, $r_c = 1,5 \text{ мм}$ [15].

Таблица 2.25
Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств регуляризацией микрогеометрии

Эксплуатационное свойство	Детали, инструмент и пары	Параметры рекомендуемых регулярных микрорельефов							Повышение свойств за счет регуляризации микрогеометрии поверхностей, раз	
		Классы и виды РМР	F_{av} , %	γ , град	R , мкм	$T_{F_{av}}$, %	N , шт./мм ²	β , град		γ , град
Износостойкость	Калибр	ЧРМР, 3, 4	25...30	50	—	—	—	—	—	1,5...2
	Подшипник	ЧРМР, 4	35...40	50	—	—	—	—	—	1,5...2
	Вакуумный подшипник	ПРМР	—	—	3...4	40	4...6	0	45	2,5
	Сверло	ЧРМР, 3	40	55	—	—	—	—	—	2...2,5
	Прессовая игла	ЧРМР, 3	15...28	54	—	—	—	—	—	1,2...1,3
	Гильза ДВС	ЧРМР, 3	34...44	48	—	—	—	—	—	1,3...1,4
	Шток пневмодлиндра	ПРМР	—	—	4...6	30	5...6	2	45	1,5...2
	Цилиндрическая направляющая	ЧРМР, 5	50	47	—	—	—	—	—	2...2,5
	Балансир	ЧРМР, 3	36...40	47	—	—	—	—	—	2...2,5
	Кольцо крутильное	ЧРМР, 5	40	60	—	—	—	—	—	2,5
	Шпиндель	ЧРМР, 3	30...33	50	—	—	—	—	—	1,4...1,5
	Пневмодлиндр	ПРМР	—	—	2,5	40	6	0	45	2...2,5
	Направляющая	ЧРМР, 5	40	47...48	—	—	—	—	—	1,6...1,8
	Лопасть	ЧРМР, 3	30	48	—	—	—	—	—	1,4

Контактная жесткость	Направляющая	ЧРМР, 3	30...33	45...48	—	—	—	—	—	1,5...2
	Опорная шаровая	ЧРМР, 3	35...40	45...50	—	—	—	—	—	1,5...2
	Лунет конический	ЧРМР, 3	30	47...48	—	—	—	—	—	1,5...2
Сопротивление задирам	Подшипник скольжения	ЧРМР, 3...5	36	44...46	—	—	—	—	—	2
	Направляющая микроскопа	ЧРМР, 3	33	57,5	—	—	—	—	—	2...2,5
Гидроплотность	Металл-графит	ПРМР	—	—	2,5...3	50	4	10	60	5...6
	Манжетное уплотнение	ПРМР	—	—	8...10	30	6	0	45	8
	Торцевое уплотнение	ПРМР	—	—	5	40	4...5	0	45	1,5...2
Прочность неподвижных соединений	Поводок топливного насоса	ПРМР	—	—	6...7	55	8...10	0	45	2,5...3
	Стальной вал	ПРМР	—	—	4...5	30	2...3	0	45	2,5...3
Сопротивление коррозии, фреттинг-коррозии	Подшипник качения	ПРМР	—	—	1...2	70	4...5	0	45	2...3
	Листовой прокат	ЧРМР, 1...5	С элементами выпуклой формы		—	—	—	—	—	2
Прочность покрытий	Ламели с покрытием драгметаллами	ПРМР	—	—	1...2	50	4	10	50	3
	Высоковольтные электроды	ПРМР	—	—	3	40	2...10	0	45	Стабильность работы

Окончание табл. 2.25

Эксплуатационное свойство	Детали, инструмент и пары	Параметры рекомендуемых регулярных микрорельефов							Повышение свойств за счет регуляризации микрогеометрии поверхностей, раз
		Классы и виды РМР	$F_n, \%$	γ , град	R , мкм	$T_{pr}, \%$ $F_{om}, \%$	N , шт./мм ²	β_n , град	
Отражательная способность	Металлические зеркала	ПРМР	—	—	—	—	—	—	До 95 %
Темп очистки при вакуумировании	Вакуумные камеры	ПРМР	—	—	0.1...0.3	—	—	—	10

Примечание. В соответствии с ГОСТ 24773–81: F_n — относительная площадь, занимаемая регулярными неровностями; γ — угол сетки (направление) следов обработки; R — высота элемента РМР; N — число элементов на 1 мм² площади; T_{pr} , F_{om} — относительная опорная площадь (p — уровень сечения профиля поверхности); β_n и γ_n — углы направления расположения элемента.

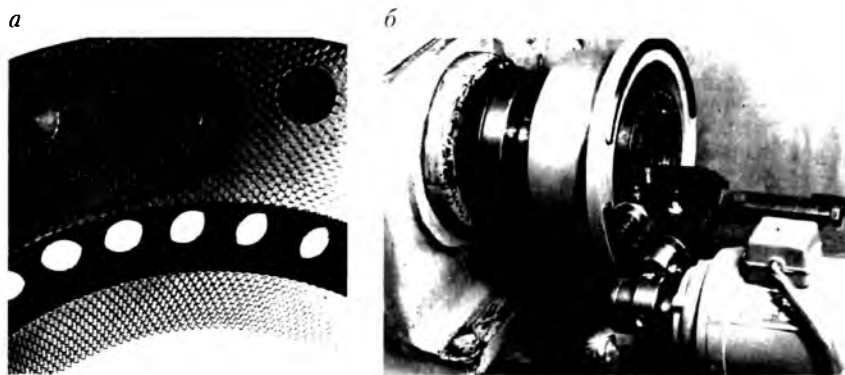


Рис. 2.89. Элемент рабочей торцевой поверхности распределителя (а) и процесс комбинированной обработки закаленных распределителей алмазным вибровыглаживанием и выглаживанием (б)

Регулярный микрорельеф на рабочей поверхности распределителя иллюстрируется рис. 2.89, а, процесс алмазного вибровыглаживания на токарно-винторезном станке мод. 1К62 с помощью специальной виброголовки с упорным роликом и выглаживателем (осуществляется без вибрации наконечника при отключенной виброголовке) показан на рис. 2.89, б.

Комбинированная обработка и регуляризация микрогеометрии рабочей торцевой поверхности распределителя обеспечивает повышение износостойкости пары блок — распределитель гидромашины в 1,7–2,0 раза и производительности труда в 3 раза и более по сравнению с шабрением.

Приведенный пример свидетельствует о том, что наиболее эффективно улучшение свойств деталей достигается комплексным воздействием факторов микрогеометрии поверхностей и физико-химического состояния подповерхностного слоя материала за счет применения отделочно-упрочняющего ППД, комбинированных и совмещенных процессов обработки. В табл. 2.26 представлены показатели улучшения некоторых эксплуатационных свойств и характеристик деталей, обеспечиваемые покрытиями, химико-термическим, лазерным и другим воздействием на материалы, с учетом воздействующих факторов.

Таблица 2.26

**Показатели улучшения эксплуатационных свойств
и характеристик прецизионных деталей и соединений**

Свойства и характеристики деталей и соединений	Повышение (+), снижение (-)	Пределы улучшения показателей	Влияние факторов микрогеометрии и состояния материала
Коэффициент трения: титановых сплавов других металлов	—	До 3 раз На 10...30 %	< МГ
Загрязненность поверхностей и зазоров	—	В 10 и 2,5 раза	< МГ
Размерная стабильность и точность деталей	+	В 2 раза	100 % СМ
Электросопротивление материала	+	До 11 %	100 % СМ
Переходное электросопротивление соединений	—	На 25 %	< МГ
Магнитные характеристики материала	+	На 30 %	< СМ
Время приработки и приработочный износ	—	В 2 раза	< СМ
Износостойкость	+	В 1,4–9,0 раза	55 % МГ и 45 % СМ
Противозадиристость	+	В 1,12–5,3 раза	62 % МГ и 38 % СМ
Прочность деталей и неподвижных соединений	+	В 1,18–2,0 раза	< СМ
Легкосплавность сдвига и плавность перемещения деталей в соединениях	+	До 2,7 раза	< МГ
Ламинарность течения газа в малых зазорах	+	В 4 раза	100 % МГ
Кумулятивность струи	+	Значительно	100 % МГ
Герметичность деталей	+	На 80 %	100 % СМ
Гидроплотность и ресурс безотказной работы подвижных соединений	+	В 2 раза	< МГ

Окончание табл. 2.26

Свойства и характеристики деталей и соединений	Повышение (+), снижение (–)	Пределы улучшения показателей	Влияние факторов микрогеометрии и состояния материала
Пневмоплотность и ресурс безотказной работы подвижных соединений	+	До 3,2 раза	< МГ
Коррозионная стойкость	+	Значительно	< СМ
Адгезия слоя покрытия	+	На 21...31 %	< МГ

Примечание. < МГ – наибольшее влияние фактора микрогеометрии поверхностей; < СМ – наибольшее влияние фактора состояния материала; 100 % МГ – преимущественное влияние одного из факторов (в данном случае – микрогеометрии поверхностей); 100 % СМ – преимущественное влияние состояния материала.

2.4.2. Точность и размерная стабильность деталей

В отношении обеспечения точности деталей необходимо прогнозировать изменение размеров поверхностей при обработке их ППД. Изменение размеров цилиндрических поверхностей в результате их пластической деформации («припуск» на обработку ППД) определяется по формуле [6, 9]

$$2z_0 = K(Rz_{исх} - Rz) = 4K(Ra_{исх} - Ra), \quad (2.14)$$

где K – коэффициент, зависящий от свойств материалов, имеет значения от 1,21 до 1,37 ($K_{ср} = 1,3$), при прецизионной обработке принимается по таблицам; $Rz_{исх}$, $Ra_{исх}$ – параметры шероховатости исходной поверхности, мкм; Rz , Ra – параметры шероховатости поверхности после обработки ППД, мкм.

Для повышения точности обработки ППД следует использовать прецизионную настройку на обработку, которая осуществляется путем перемещения приспособления в направлении к обрабатываемой поверхности после касания с ней деформирующего инструмента на величину Z . Касание инструмента с обрабатываемой поверхностью может определяться по рискам подвижных и неподвижных элементов приспособлений, индикатору или по фольге,

которая зажимается между заготовкой и инструментом при настройке. Значение Z определяется по формуле

$$Z = 0,75Rz_{\text{исх}} + \Delta + t_{\phi} + \frac{P}{j} = 3Ra_{\text{исх}} + \Delta + t_{\phi} + \frac{P}{j}, \quad (2.15)$$

где Δ — биение, отклонение формы обрабатываемой поверхности, мкм; t_{ϕ} — толщина фольги, мкм; P — сила поджима инструмента и поверхности, Н; j — жесткость приспособления и суппорта станка, принимается $j = 90$ Н/мкм.

Использование прецизионной настройки позволяет ограничить пластическую деформацию высотой микронеровностей, обрабатывать прерывистые прецизионные поверхности без завалов кромок.

Обработка ППД показала хорошее соответствие фактических и экспериментальных данных по изменению диаметрального размера и шероховатости поверхности. Однако при обработке тонкостенных деталей с соотношением толщины стенки h_c и диаметра D_3 заготовки порядка 0,02–0,05 следует соблюдать дополнительные ограничения для получения необходимого качества поверхности и точности формы.

Для выявления влияния силы обкатывания на изменение диаметральных размеров тонкостенных деталей микроэлектромашин автоматики из отожженного титанового сплава ИТ1-1 были изготовлены кольца высотой 7,5 мм с наружной поверхностью диаметром $D_3 = 47,4$ мм и толщиной стенки $h_c = 1,1$ мм ($h_c/D_3 = 0,0232$). Одна часть колец была обработана по наружной поверхности обкатыванием, другая — виброобкатыванием ($d_{\text{ш}} = 15$ мм; $S = 0,097$ мм/об). При виброобкатывании (рис. 2.90, а; кривая 2) сила оказывает большее влияние на изменение размеров, чем при обкатывании (кривая 1). Если сила не превышает 300 Н, при данных условиях обкатывания происходит уменьшение диаметра в результате уменьшения шероховатости поверхности — металл выступов исходных неровностей заполняет впадины. При силе, большей 300 Н, происходит увеличение диаметра в результате раздачи колец на оправке.

На рис. 2.90, б показаны зависимости овальности колец $\Delta_o = D_{\text{max}} - D_{\text{min}}$ (D_{max} , D_{min} — максимальный и минимальный наружные диаметры кольца, мм) от диаметра $d_{\text{ш}}$. Отделочная обработка колец по наружной цилиндрической поверхности ППД ($P = 100$ Н,

$S = 0,07$ мм/об; $D_3 = 75,8$ мм; $h_c = 3,2$ мм; $h_c/D_3 = 0,042$, высота 16 мм) обеспечивает уменьшение овальности при накатывании шарами диаметром $d_{ш} \leq 12$ мм (кривая 1) и при виброобкатывании шарами диаметром $d_{ш} \leq 4$ мм (кривая 2). С увеличением размеров шаров выше указанных значений овальность образцов возрастает.

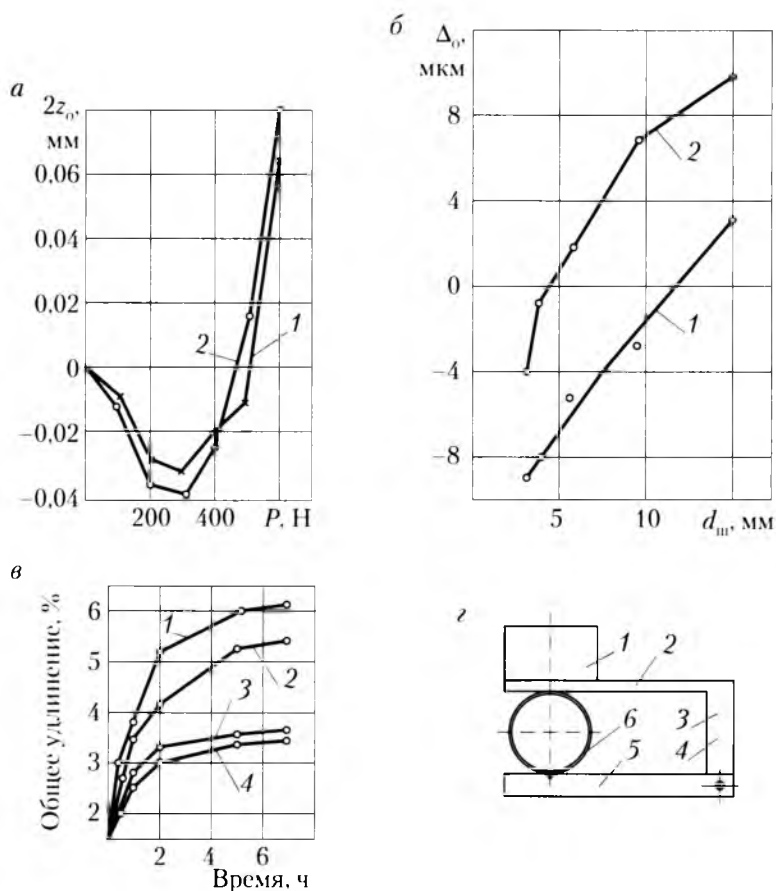


Рис. 2.90. Влияние параметров режима обработки на изменение размеров (а) и формы (б) тонкостенных деталей при обкатывании (кривая 1) и виброобкатывании (кривая 2), времени нагружения образцов деталей на деформацию (в) и схема устройства для испытания тонкостенных деталей на размерную стабильность (г)

Неполные сведения о влиянии технологических факторов и, в частности, отделочной обработки ППД на ползучесть металлов сделали необходимым проведение исследований этого отрицательного явления в целях его уменьшения в прецизионных деталях машин и приборов.

Результаты испытания образцов из ВТ1-1 с различной обработкой на ползучесть по ГОСТ 3248–81 показаны на рис. 2.90, в. Наибольшее удлинение имеют обточенные образцы (кривая 1). Если принять их удлинение при семичасовом нагружении за 100 %, то удлинение шлифованных образцов (кривая 2) составило 88,5 %; обкатанных (кривая 3) — 60,0 %, а виброобкатанных (кривая 4) — 57,4 %. Меньшее удлинение обработанных ППД образцов объясняется значительным упрочнением подповерхностного слоя материала.

Для приближения испытания к условиям работы деталей в изделиях автором предложен способ испытания тонкостенных колец на размерную стабильность в условиях ползучести металла (рис. 2.90, г). Тонкостенные кольца-образцы 6 размещаются на основании 5 многоместного устройства и нагружаются грузом 1, устанавливаемым на планку 2, которая шарнирно посредством оси 3 соединена со стойкой 4 основания 5. В результате длительного действия груза в образце проявляются пластичность и ползучесть металла, что приводит к изменению овальности образца вследствие уменьшения диаметра в направлении действия груза и увеличения диаметра в перпендикулярном направлении. Критерием оценки размерной стабильности принято изменение овальности Δ_0 колец-образцов, выполненных по диаметральному размеру деталей изделий.

Для испытания на размерную стабильность были изготовлены кольца из сплава ВТ1-1 в отожженном состоянии с толщиной стенки $h_c = 1,1$ мм и высотой 7,5 мм, обработанные по наружному диаметру $D_3 = 47,7$ мм точением, шлифованием, обкатыванием и виброобкатыванием (ПРМР, $P = 100$ Н, $d_{ш} = 15$ мм). После измерения кольца устанавливались в устройство (рис. 2.90, г) и нагружались грузом весом 32 Н.

Изменение овальности Δ_0 образцов, обработанных ППД, значительно меньше, чем у образцов, обработанных типовой обработкой титановых заготовок деталей — точением (рис. 2.91, а). Обкатанные

и виброобкатанные кольца за время нагружения 113 ч имели увеличение овальности по сравнению с обточенными соответственно на 34,3 и 46,1 % меньше. Поэтому наилучшей обработкой при изготовлении тонкостенных деталей с точки зрения размерной стабильности при комнатной температуре можно считать виброобкатывание и обкатывание.

Результаты исследования размерной стабильности тонкостенных колец из сплава ВТ1-1 с различной обработкой при рабочих температурах прецизионных микроэлектромашин иллюстрирует график (рис. 2.91, б). Обработка колец обкатыванием и виброобкатыванием производилась с силой $P = 400$ Н. Изменение овальности на обработанных ППД кольцах (кривые 3, 4) при различных температурах (время нагружения в одном температурном интервале 23 ч) значительно меньше, чем на обточенных (кривая 1) и шлифованных (кривая 2). Так, при температуре 333 К увеличение овальности обкатанных (кривая 3) и виброобкатанных (кривая 4) колец составило соответственно 48,5 и 44,6 % по сравнению с увеличением овальности обточенных колец (кривая 1).

Таким образом, замена отделочной обработки резанием обработкой ППД целесообразна. Отделочная обработка ППД обеспечивает уменьшение ползучести титана ВТ1-1 до 39,4 % при испытании по ГОСТ 3248–81. Особенно ценно, что обработка ППД приводит к повышению размерной стабильности тонкостенных титановых деталей до 46,1 % при температуре 293 К и до 55,4 % в интервале температур до 393 К.

Как показал анализ выходов из строя микроэлектромашин автоматики в период предусмотренного ресурса хранения и эксплуатации, одной из причин забракования машин является изменение геометрической формы деталей и нарушение постоянства и одномерности воздушных зазоров между деталями магнитной цепи. Детали типа цилиндрических тонкостенных корпусов и колец из сплава ВТ1-1, обработанные точением и шлифованием, изменяли свою геометрическую форму за счет пластичности и ползучести металла, проявляемых при сравнительно небольших, но одномерно направленных эксплуатационных нагрузках.

С применением обработки ППД выявляются два новых обстоятельства: 1) в результате пластической деформации подповерхностного слоя металла возникают дополнительные внутренние

напряжения, которые хотя и незначительно, из-за небольшой толщины деформированного слоя, но могут отражаться на форме деталей в процессе изготовления и в период хранения и эксплуатации; 2) упрочнение металла, проявляемое в повышении твердости подповерхностного слоя — оболочки детали и в создании внутренних сжимающих напряжений, способствует повышению стабильности

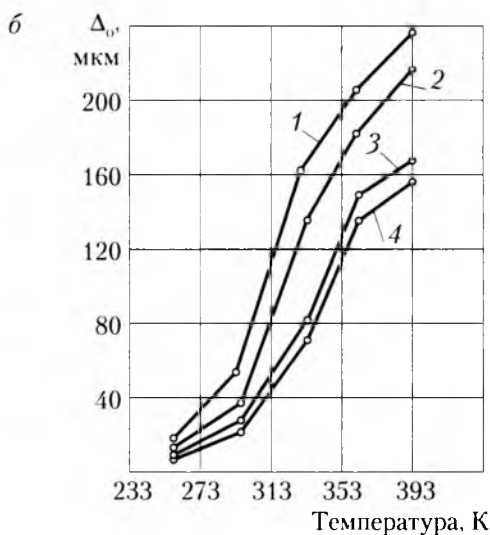
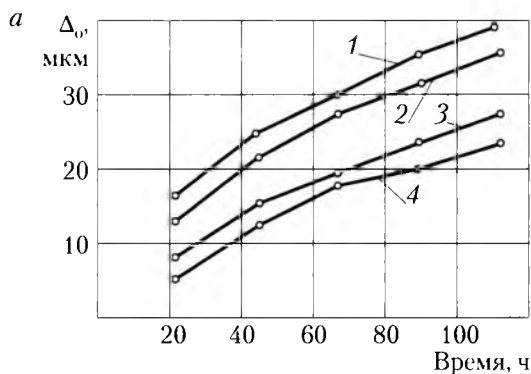


Рис. 2.91. Зависимость размерной стабильности тонкостенных титановых деталей с различной обработкой от времени нагружения (*a*) и температуры (*б*):

1 — точение; 2 — шлифование; 3 — обкатывание; 4 — виброобкатывание

формы и размеров деталей в результате уменьшения проявления ползучести титанового сплава.

Анализ результатов обработки ППД по внутренней цилиндрической поверхности диаметром 45H7 одного из корпусов, по наружным цилиндрическим поверхностям диаметром 9h5 сердечника и диаметром 51,8_{-0,04} другого корпуса асинхронного двигателя-тахогенератора показал, что накатывание внутренних и наружных поверхностей деталей такого двигателя удовлетворяет установленным требованиям по точности и микрогеометрии рабочих поверхностей. Уменьшение диаметральных размеров корпусов не превышает 5 мкм, сердечника — 3 мкм.

Отношение фактической величины и расчетного значения изменения диаметрального размера (остаточной деформации), определенного по формуле (2.15), не превышает 12,5 % при обработке корпусов и 15 % — при обработке сердечников. Обработка корпусов и колец тахоагрегата ППД при указанных параметрах режима не привела к изменению геометрической формы деталей. При этой обработке наблюдается некоторое уменьшение их овальности. Завалов кромок поверхностей корпусов, колец и сердечников, обработанных ППД с прецизионной настройкой по величине Z , которая определялась по формуле (2.15), не наблюдалось.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод, что правильное использование отделочно-упрочняющей обработки ППД при изготовлении деталей из титановых сплавов дает хороший технический эффект и обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики машин и приборов в течение продолжительного периода хранения и эксплуатации изделий. Подобные результаты достигаются на деталях из других вязкопластичных материалов, обладающих ползучестью, которая проявляется даже при очень низких температурах. Например, по данным В.П. Дегтярева, кадмий ползет с ощутимой скоростью при 4 К, а ползучесть железа со скоростью до 10^{-3} % наблюдается при 78 К. Это значит, что эффект повышения размерной стабильности за счет уменьшения проявления ползучести и пластичности распространяется и на детали из других вязкопластичных металлов.

2.4.3. Коэффициент трения и прирабатываемость пар

Определение коэффициентов и сил трения в парах при переменной силе поджима колодок к наружной поверхности корпусов (валов, осей) осуществлялось с помощью тензометрического устройства (рис. 2.92, *а*) с измерительной системой, которое можно использовать также для исследования схватывания и других фрикционных явлений в контакте цилиндрических поверхностей. Устройство состоит из корпуса 12, в котором расположена неподвижная колодка 7 и подвижная самоустанавливающаяся обойма 5 с колодкой 6, стакана 1, тарированной пружины 2, упирающейся одним концом в уступ регулировочного винта 14, другим — в торец отверстия штока 3, который соединен посредством сухарей 4 с обоймой 5. На стакане 1 размещена шкала 13 для установки необходимой силы сжатия пружины 2. В качестве чувствительного элемента при измерении коэффициента трения (силы, момента трения) между образцом и колодками 6, 7 применена балка равного сопротивления 11 в виде пластины толщиной 1,65 мм (сталь 50Г), заземленная одним концом в вырезе корпуса 12 посредством винтов 9. На балке наклеены тензорезистор (тензодатчик) 10 из константана с сопротивлением 190 Ом и колодка 8 для вывода концов тензорезистора, подключенного к электропреобразователю, в качестве которого использован полупроводниковый терморегулятор ПТР2-01 с заменой нескольких сопротивлений. Электропреобразователь соединен с исполнительным механизмом отключения станка и с показывающим прибором (миллиамперметром), оттарированным под коэффициент трения (силу, момент трения) в контакте образцов с колодками.

Установка на базе станка мод. 1К62 для испытания показана на рис. 2.92, *б*. Установка и устройство работают следующим образом. Образец закрепляется на оправке, зажатой в патроне станка. Устройство устанавливается на образец и колодками 6, 7 охватывает его. Прижим колодок к образцу обеспечивается винтом 14 путем сжатия пружины 2. При вращении образца возникающая сила трения стремится повернуть устройство в направлении вращения. Корпус 12 удерживается от поворота балкой равного сопротивления 11, упирающейся свободным концом в резцедержатель станка. Балка 11 изгибается пропорционально коэффициенту

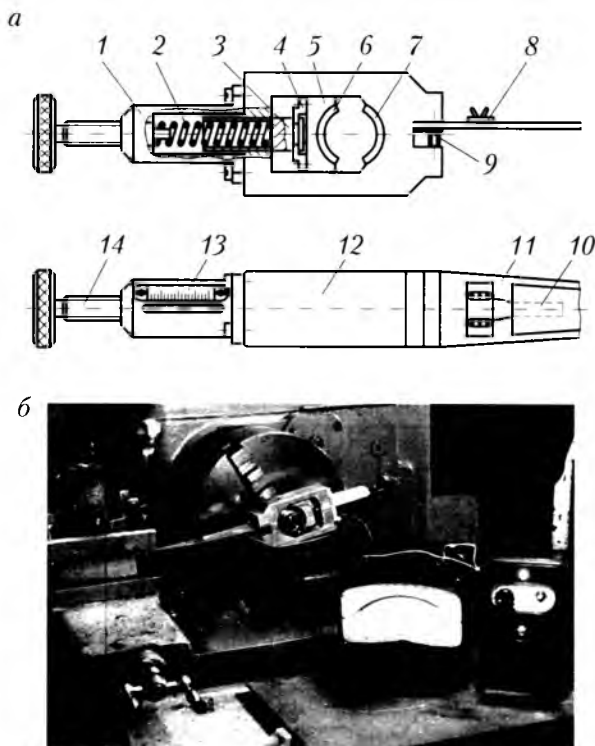


Рис. 2.92. Тензометрическое устройство (а) и установка на базе станка мод. 1К62 (б) для испытания цилиндрических пар на фрикционные свойства

(силе, моменту) трения, вызывая деформацию тензорезистора 10, изменение сопротивления которого через электропреобразователь контролируется по показывающему прибору (миллиамперметру). При исследовании схватывания в момент резкого возрастания силы трения (момент схватывания) устройство посредством исполнительного механизма отключает станок.

Для проведения испытаний пар твердое тело — твердое тело на коэффициент трения использовались образцы по размерам деталей из титанового сплава ВТ1-1 диаметром 25 мм, обработанные обтачиванием (разновидность 3), шлифованием (разновидность 5), обкатыванием шаром диаметром $d_{ш} = 9,5$ мм (разновидность 0; $P = 300$ Н; $S = 0,07$ мм/об) и виброобкатыванием шаром (ПРМР,

разновидность 0) с общей шероховатостью ($Ra_{cp} = 4$ мкм). Вкладыши обрабатывались: из закаленной стали ШХ15 доводкой ($Ra_{cp} = 0,1$ мкм); из сплава ВТ1-1 торцовым точением ($Ra_{cp} = 0,8$ мкм). Перед испытанием образцы и вкладыши промывались в керосине. Результаты испытаний по пяти замерам показали (табл. 2.27), что коэффициент трения пары снижается с 0,32 при шлифовании (РВ 5) и 0,31 при обтачивании (РВ 3) до 0,28 и 0,29 (РВ 0) соответственно при обработке титановых поверхностей обкатыванием и виброобкатыванием.

Таблица 2.27

**Коэффициент трения при контактировании титановых деталей
с деталями из стали и сплава ВТ1-1**

Способ обработки	Образцы деталей из ВТ1-1		Колодки					
			из стали ШХ15			из сплава ВТ1-1		
	HV	Ra_{cp}	HRC	Ra_{cp}	f_d	HV	Ra_{cp}	f_d
Точение	163	0,4	66	0,1	0,27	165	0,8	0,31
Шлифование	166	0,4	66	0,1	0,28	165	0,8	0,32
Обкатывание	215	0,4	66	0,1	0,24	165	0,8	0,28
Виброобкатывание	225	0,4	66	0,1	0,25	165	0,8	0,29

Эффективное влияние на коэффициент трения оказывает химико-термическая обработка титановых сплавов. Если принять значение коэффициента трения сплава ВТ1-1 без химико-термической обработки за 100 %, то значение коэффициента будет соответствовать 66,5 % при оксидировании образцов в воздушной среде; 45,4 % при азотировании образцов; 35,7 % при насыщении подповерхностного слоя металла ферромарганцем и 33,3 % при вакуумном оксидировании образцов. Таким образом, с применением вакуумного оксидирования коэффициент трения поверхностей титановых сплавов снижается в 3 раза.

Установлено, что применением комбинированной обработки ППД с последующим вакуумным оксидированием можно снизить коэффициент трения титанового сплава по титановому сплаву с 0,5 и даже 0,7 (при трении без смазывания) до значений 0,05...0,09. Выявлено также, что электролитическое сульфидирование поверхностей титановых сплавов приводит к снижению коэффициента трения f_d на 12 %.

Результаты испытания на коэффициент трения пары из материалов чаши и ротора гироскопа АШГ-100 представлены в табл. 2.28.

Таблица 2.28

**Значения коэффициента трения для пары
из бронзы БрО8С12 и стали ШХ15**

Способ обработки образцов, разновидность поверхности и параметры режима	Твердость		Коэффициент трения f_d
	бронзовых образцов HV	стальных вкладышей HRC	
Обтачивание (разновидность 3)	77.6	66	0.18
Алмазное выглаживание (разновидность 0, $r_c = 3.25$ мм, $P = 15...20$ Н)	99.2	65	0.13
Обкатывание (разновидность 1, $d_{\text{ш}} = 7.1$ мм, $P = 15...20$ Н)	94.5	65	0.15

Наименьшим коэффициентом трения обладают поверхности вида 0, обеспечиваемые алмазным выглаживанием, при котором «заглаживаются» поры литой бронзы и полностью устраняются ПН.

Образцы зажимались в патроне станка, перемещение колодок вдоль оси не вращающегося образца обеспечивалось суппортом станка, при этом сила трения измерялась динамометром механического действия. Сила поджима колодок к образцу изменялась вращением винта 14 (см. рис. 2.92, а) и контролировалась по шкале 13. Для испытания были изготовлены образцы и колодки из стали 12Х18Н10Т диаметром 27 мм и из алюминиевого сплава АК-9 (АЛ4) диаметром 22 мм. Колодки изготавливались путем разрезки втулок длиной 35 мм ($D_3 = 27$ мм) и 31 мм ($D_3 = 22$ мм). Рабочие поверхности образцов и колодок обрабатывались точением с обеспечением $Ra = 1.6$ мкм и разновидности 5. Пары испытывались в условиях сухого трения (после промывки в спирте) и смазывания индустриальным маслом И-20А.

Обобщенные данные актов испытаний представлены в табл. 2.29, из которой следует, что смазывание трущихся пар снижает коэффициент трения в среднем на 10...30 %. В зависимости от направления относительного перемещения колодок коэффициент трения может изменяться в среднем на 15...25 % и более. С возрастанием силы прижима колодок к образцам коэффициент трения имеет

тенденцию к уменьшению, при этом уменьшается также и изменение коэффициента трения в зависимости от направления перемещения колодок относительно образцов. Такое явление можно связать с деформированием ПН при повышении давления в контакте пары трения.

Для испытания пар твердое тело — эластик использовались образцы из стали 12Х18Н10Т и колодки с резиновыми наклейками. Изменение коэффициента трения в контакте пары твердое тело — эластик при изменении условий работы можно проследить по табл. 2.30, где представлены обобщенные данные актов наблюдения испытаний.

Таблица 2.29

Динамика изменения коэффициента трения f_d при изменении условий работы подвижных соединений

Материалы и размеры элементов пар	Сила прижима $P_{пр}$, Н	Давление p_r , кПа	Без смазывания				Со смазыванием			
			1	2	3	4	1	2	3	4
Сталь 12Х18Н10Т ($D = 27$ мм, $l_k = 35$ мм)	15	16.2	0.19	0.18	0.20	0.22	0.09	0.07	0.10	0.10
	20	21.6	0.22	0.17	0.24	0.21	0.14	0.10	0.16	0.14
	40	43.2	0.16	0.13	0.20	0.21	0.13	0.11	0.17	0.16
	60	64.9	0.14	0.12	0.20	0.19	0.12	0.10	0.17	0.17
	80	86.5	0.13	0.12	0.18	0.18	0.11	0.10	0.16	0.15
	115	124.3	0.11	0.10	0.18	0.17	0.11	0.09	0.14	0.13
	140	151.4	0.10	0.10	0.16	0.16	0.09	0.08	0.13	0.12
	170	183.0	0.10	0.09	0.15	0.15	0.09	0.08	0.11	0.12
Алюминиевый сплав АК-9 (АЛ4) ($D = 22$ мм, $l_k = 31$ мм)	15	22.0	0.35	0.29	0.30	0.28	0.31	0.28	0.28	0.27
	20	29.3	0.35	0.31	0.30	0.27	0.29	0.27	0.29	0.25
	40	58.7	0.30	0.26	0.25	0.23	0.25	0.24	0.22	0.21
	60	88.0	0.30	0.23	0.26	0.24	0.24	0.20	0.22	0.20
	80	117.3	0.24	0.20	0.24	0.21	0.21	0.20	0.18	0.18
	115	168.6	0.21	0.20	0.20	0.19	0.20	0.18	0.16	0.17
	140	205.3	0.20	0.18	0.20	0.17	0.16	0.15	0.17	0.15
	170	249.3	0.21	0.18	0.18	0.16	0.15	0.14	0.14	0.12

Примечание. Цифрами обозначены направления: 1 — прямое, 2 — обратное, 3 — влево, 4 — вправо.

Таблица 2.30

**Изменение коэффициента трения пары
твердое тело (сталь) — эластик (резина)**

Сила прижима $P_{\text{пр}}, \text{Н}$	Давление $p_r, \text{кПа}$	Без смазывания				Со смазыванием			
		1	2	3	4	1	2	3	4
15	16.2	0.58	0.62	0.60	0.63	0.37	0.39	0.39	0.38
20	21.6	0.59	0.62	0.62	0.64	0.45	0.44	0.48	0.46
40	43.2	0.65	0.65	0.68	0.66	0.51	0.49	0.54	0.46
60	64.9	0.67	0.68	0.69	0.69	0.59	0.52	0.57	0.54
80	86.5	0.70	0.69	0.70	0.74	0.66	0.67	0.61	0.62
115	124.3	0.72	0.74	0.73	0.77	0.68	0.70	0.67	0.66
140	151.4	0.77	0.79	0.77	0.80	0.72	0.72	0.71	0.69
170	183.0	0.79	0.82	0.81	0.82	0.72	0.75	0.74	0.73

Примечание. Значение цифр 1–4 см. в табл. 2.29.

Как следует из табл. 2.30, коэффициент трения резины по металлу мало зависит от направления относительного перемещения, но систематически повышается при увеличении давления с 16,2 до 183 кПа в среднем с 0,61 до 0,81. Смазывание пары трения индустриальным маслом И-20А приводит к снижению коэффициента трения при $p_r = 16,2$ кПа в среднем на 37 %. Однако при повышении давления в контакте элементов пары до 183 кПа разница значений коэффициента трения при работе в смазанном состоянии снижается до 10 %, или в 3,7 раза. Такое явление можно объяснить малым значением фактической площади контакта поверхностей с ПН и повышенной способностью последних проникать через масляную пленку и разрушать ее.

Взаимодействие твердых тел с волокнистой массой характеризуется скоростью относительного перемещения, микрогеометрией твердого тела и другими факторами. По данным А.П. Кононенко и Ю.Н. Голубова, коэффициент трения нейлоновой пряжи по поверхности нитеводителей достигает 0,51...0,83 при шероховатости рабочей поверхности нитеводителей с $Ra = 0,049$ мкм, затем резко падает до значений ниже 0,3 при $Ra = 0,86$ мкм и дальше не изменяется в пределах до $Ra = 1,72$ мкм.

Показателями прирабатываемости следует считать длительность приработки и приработочный износ, а также отсутствие появления дефектов поверхности в процессе приработки.

Испытания на прирабатываемость проводились по схеме, показанной на рис. 2.93, *а* (А.с. 110825), на станке мод. 1А616 с обиль-

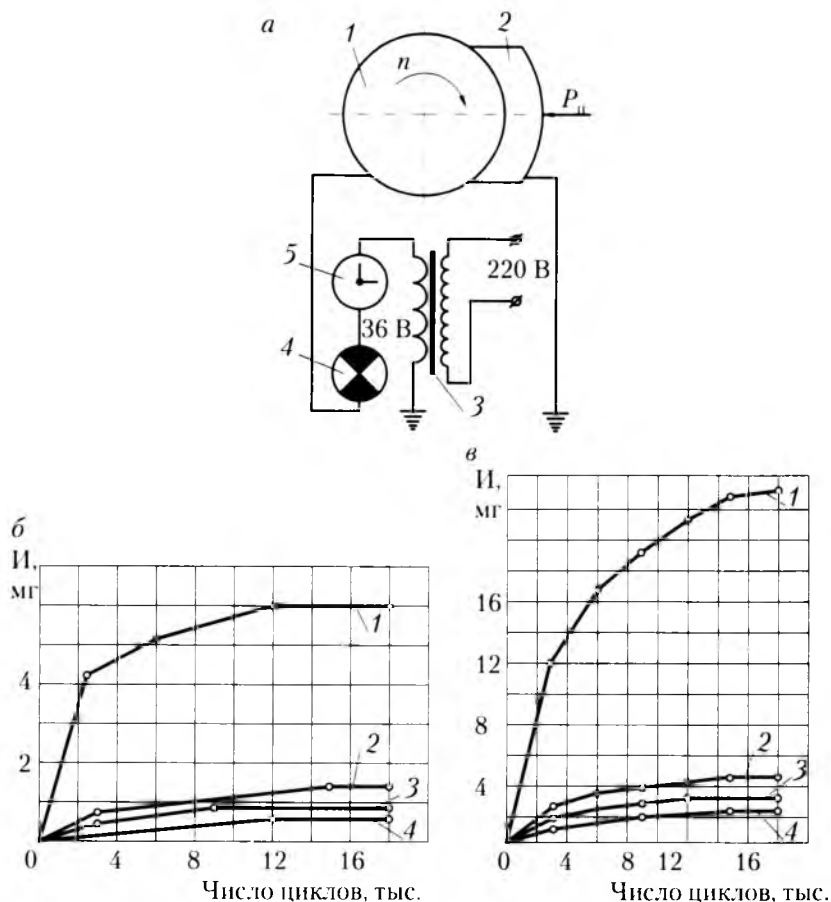


Рис. 2.93. Испытания на прирабатываемость:

а — схема испытания (1 — деталь, 2 — колодки, 3 — трансформатор понижающий, 4 — электролампочка, 5 — электрочасы); *б, в* — зависимость массового износа образцов и колодок от числа циклов истирания (1 — шлифование, 2 — обтачивание, 3 — обкатывание, 4 — виброобкатывание)

ной смазкой пары трения смесью, состоящей из индустриального (80 %) и цилиндрического (20 %) масел. Сила прижима $P_n = 30$ Н обеспечивала давление колодки на поверхность образца 133 кПа. В процессе приработки фактическая площадь контакта между колодкой и образцом увеличивалась, контактное давление уменьшалось и достигало такого значения, при котором масляная пленка между трущимися поверхностями не прерывалась. Электрическая цепь при этом размыкалась, лампа гасла, а часы останавливались.

В результате испытания выявлено, что наиболее благоприятным и рациональным с точки зрения уменьшения времени приработки и приработочного износа для наружной цилиндрической поверхности образцов из ВТ1-1 с $D_3 = 25$ мм, $Ra = 1,25$ мкм является микрогеометрия обкатанной поверхности ($P = 300$ Н, $d_{ш} = 9,5$ мм). Для принятых условий и колодок из стали 45 с твердостью 46...49 HRC микрогеометрия обработанных ППД поверхностей оказалась более оптимальной с точки зрения прирабатываемости по сравнению с микрогеометрией поверхностей обточенных и шлифованных образцов (табл. 2.31).

Таблица 2.31

**Показатели прирабатываемости поверхностей титановых деталей
в паре со стальными колодками**

Способ обработки образцов и разновидность поверхности	Время приработки, мин	Износ приработки	
		мг	мкм
Шлифование, разновидность 5	140	2.0	13.0
Точение, разновидность 3	110	1.6	9.0
Обкатывание, разновидность 0	62	0.7	4.5
Виброобкатывание, разновидность 1	85	1.1	6.5

Характерно, что длительность приработки и приработочный износ тем меньше, чем больше радиус скругления вершин неровностей и выше степень их однородности по высоте.

2.4.4. Износостойкость пар трения

Испытание на изнашивание титановых деталей проводилось на образцах из титанового сплава ВТ1-1 в состоянии поставки при истирании их колодками из серого чугуна СЧ10. Наружные

цилиндрические поверхности образцов диаметром 47 мм обрабатывались с обеспечением высоты неровностей $Rz = 1,7...3,1$ мкм четырьмя способами: шлифованием, обтачиванием, обкатыванием ($P = 300$ Н; $d_{ш} = 15$ мм; $S = 0,097$ мм/об) и виброобкатыванием (ПРМР). Рабочие поверхности колодок обрабатывались растачиванием с обеспечением высоты неровностей $Rz = 9$ мкм. Образцы подвергались истиранию на станке мод. 1К62 с помощью многоместного устройства при частоте вращения шпинделя $n_3 = 200$ об/мин, 6 циклов по 15 мин. Тарированными пружинами устройства обеспечивалась сила прижима колодок к образцам 50 Н, что создавало давление между колодкой и образцом 143 кПа. Пара смазывалась индустриальным маслом И-20А.

Массовый износ образцов в зависимости от числа циклов (оборотов) истирания и способа обработки представлен на рис. 2.93, б. Износ шлифованных образцов при 18 тыс. циклов истирания составил 6 мг (кривая 1), обточенных 1,4 мг (кривая 2), обкатанных — 0,8 мг (кривая 3), виброобкатанных — 0,6 мг (кривая 4). Если принять износ шлифованных образцов (разновидность 5) за 100 %, то износ обточенных образцов (разновидность 2) составил 23 %, обкатанных (разновидность 1) — 13 %, а виброобкатанных (разновидность 0) — 10 %.

На рис. 2.93, в показан износ колодок в зависимости от числа циклов истирания и способа обработки образцов. Массовый износ колодок, работавших в паре со шлифованными образцами, составил 23 мг (кривая 1), с обточенными — 4,6 мг (кривая 2), с обкатанными — 3,0 мг (кривая 3) и с виброобкатанными — 2 мг (кривая 4). По износу колодок можно заключить, что обработанные ППД поверхности титановых сплавов обладают по сравнению с поверхностями, обработанными резанием, меньшей «режущей способностью» и приводят при данных условиях испытания к меньшему износу второго элемента пары трения.

Для исследования влияния относительной площади F_n , занимаемой регулярными неровностями (канавками), и среднего арифметического отклонения профиля Ra исходной поверхности виброобкатанных (ЧРМР вида 3) наружных цилиндрических поверхностей титанового сплава ВТ1-1 в отожженном состоянии на износостойкость были изготовлены образцы диаметром 39 мм и высотой 18 мм пяти групп с шероховатостью поверхности перед виброобкатыва-

нием с величиной Ra , равной 1,6; 0,8; 0,4; 0,2 и 0,1 мкм. В каждой группе виброобкатывание производилось при частоте n_3 вращения заготовки 18, 36, 42, 55, 69, 140, 262 мин⁻¹, что обеспечивало величины отношений $i = n_{\text{дв.х}}/n_3$ соответственно равные 164, 82, 69, 54, 43, 21 и 11. Все остальные параметры режима виброобкатывания были постоянными ($P = 250$ Н; $d_{\text{ш}} = 5,6$ мм; $S = 2,2$ мм/об; $2A = 1,6$ мм; число проходов $n_{\text{пр}} = 1$). Относительная площадь $F_{\text{н}}$ образцов соответствовала значениям: 21,2; 28,2; 47,7; 58,5; 74,8; 85,7; 99,0.

Истирание образцов производилось на станке 1А616 колодками из серого чугуна СЧ10 при подаче в зону трения индустриального масла И-20А. За критерии изнашивания принято количество циклов истирания для достижения одинакового сближения p (линейный износ) и изменение массы образцов (массовый износ) при одинаковом количестве циклов истирания.

Сближение p определялось по изменению глубины канавок h ($h_{\text{исх}} = 10$ мкм) по профилограммам, снимаемым на профилографе-профилометре мод. 201 с одних и тех же поверхностей.

На рис. 2.94, а показаны число циклов, потребное для достижения при истирании сближения $p = h_{\text{исх}} = 10$ мкм (кривая 1), и массовый износ при 1575 циклах истирания (кривая 2) в зависимости от исходного значения $F_{\text{н}}$ (исходная поверхность с $Ra_{\text{ср}} = 0,4$ мкм). Близкими к рациональным значениям для сопротивления виброобкатанных (ЧРМР, разновидность 3) поверхностей сплава ВТ1-1 изнашиванию являются значения $F_{\text{н}}$ 41...63 % ($F_{\text{иср}} = 52$ %).

На рис. 2.94, б представлен график зависимости массового износа от шероховатости исходной поверхности при $F_{\text{н}} = 21,2$ %. Из графика следует, что по мере уменьшения значения Ra с 1,6 до 0,1 мкм массовый износ виброобкатанных поверхностей (ЧРМР, разновидность 3) при одинаковом сближении $p = 2$ мкм увеличивается с 15,2 до 17,9 мг. Такое явление связано с тем, что объем металла истираемого слоя, равного по толщине сближению $p = 2$ мкм, у грубообработанных поверхностей меньше, чем у поверхностей с малым значением Ra .

Комбинированная обработка ППД и вакуумным оксидированием положительно сказывается на износостойкости поверхностей титановых сплавов. В подтверждение этого можно привести результаты испытания на износостойкость трех групп образцов из титано-

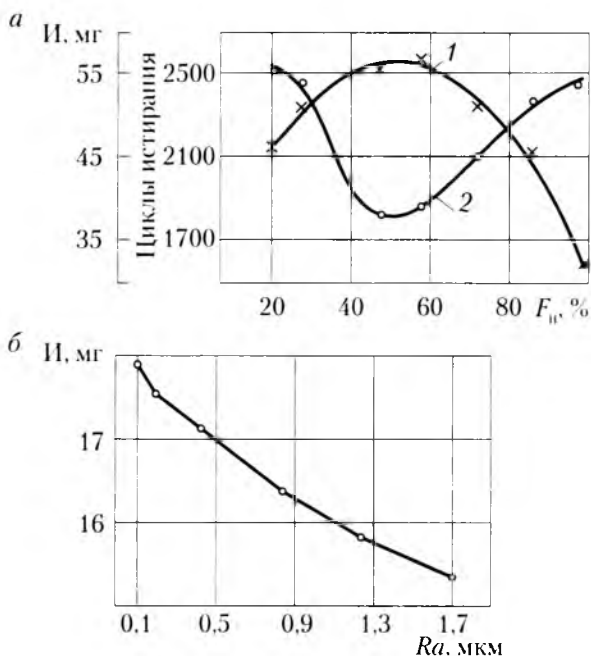


Рис. 2.94. Зависимость показателей изнашивания титановых деталей от параметров микрогеометрии вибронакатанных поверхностей (ЧРМР, вид 3): a — относительной площади $F_{ш}$: 1 — циклы истирания при сближении $p = 10$ мкм; 2 — массовый износ при 1575 циклах истирания; b — параметра Ra исходной поверхности при $F_{ш} = 21.2$ %, $p = 2$ мкм

вого сплава ВТ1-1 диаметром $D_3 = 36$ мм. Первая группа образцов обработана точением (разновидность 4), вторая — обкатыванием (разновидность 0), $P = 50$ Н, $d_{ш} = 15$ мм, $S = 0,11$ мм/об, $n_3 = 500$ мин⁻¹ и третья группа — виброобкатыванием с обеспечением ПРМР и разновидности 0. На всех образцах обеспечивалась наружная цилиндрическая (рабочая) поверхность с $Ra_{ср} = 0,4$ мкм. Кроме того, каждая группа образцов была разделена на две подгруппы, одна из которых подверглась вакуумному оксидированию. За критерий изнашивания было принято изменение массы образцов при 1500 циклах истирания. Истирание производилось колодками из закаленной (твердость 43 HRC) стали 45 при давлении колодки на образец 150 кПа. Результаты исследования представлены в табл. 2.32.

Таблица 2.32

**Показатели изнашивания титановых образцов деталей
с комбинированной обработкой**

Показатель	Подгруппа образцов	
	Без вакуумного оксидирования (металл в состоянии поставки)	С вакуумным оксидированием
Массовый износ, мг:		
1-я группа — точение [разновидность (РВ) 4]	62,1	0,5
2-я группа — обкатывание (РВ 0)	40,5	0,4
3-я группа — вибрационное обкатывание (РВ 0)	29,5	0,35
Уменьшение износа образцов 3-й группы относительно износа образцов 1-й группы, %	52,6	30,0

По табл. 2.32 ориентировочно можно считать, что повышение износостойкости обработанных ППД поверхностей титановых сплавов обеспечивается на 55 % вследствие оптимизации микрогеометрии поверхности и на 45 % вследствие оптимизации физико-химических параметров состояния подповерхностного слоя материала деталей.

Испытание на износостойкость деталей демпферов с химическим никелевым покрытием проводилось на установке на базе токарно-винторезного станка мод. ТВ-320, оснащенного специальным устройством, имитирующим работу демпферов, калибров (пробок) и плунжеров насосов.

Сопоставлялся износ пар трения, детали которых обработаны способами резания и ППД четырех сочетаний: 1) цилиндр и поршень — доводка; 2) цилиндр — доводка, поршень — алмазное выравнивание; 3) цилиндр — алмазное выравнивание, поршень — доводка; 4) цилиндр и поршень — алмазное выравнивание.

Из рис. 2.95, а видно, что суммарный линейный износ (увеличение зазора) при 12,375 тыс. циклах истирания составил для сочетаний обработки: 1 — 13,26 мкм (кривая 1); 2 — 10,0 мкм (кривая 2); 3 — 8,5 мкм (кривая 3) и 4 — 4,17 мкм (кривая 4).

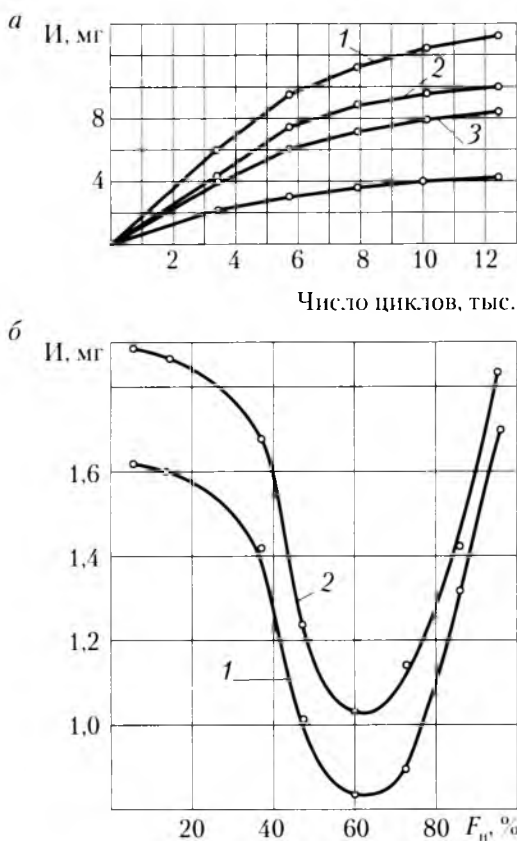


Рис. 2.95. Зависимости износа пары трения демпфера с никелевым покрытием от числа циклов истирания (а) и деталей из закаленных сталей от относительной площади F_n при вибровыглаживании рабочих поверхностей (б)

Таким образом, размерный износ пар с химическим никелевым покрытием (при трении без смазывания), обработанных алмазным выглаживанием, снижается в 3,25 раза по сравнению с износом пар трения, детали которых обработаны доводкой.

Для испытания на изнашивание цилиндрических поверхностей в зависимости от относительной площади F_n были изготовлены образцы из стали У10 (твердость 62...64 HRC) диаметром 11,5 мм, высотой 10 мм. После доводки ($Ra = 0,04...0,08$ мкм)

образцы были обработаны при помощи вибровыглаживания алмазным наконечником с обеспечением ЧРМР вида 3.

Результаты испытания при 41 400 циклах истирания в смазанном маслом И-20А состоянии иллюстрирует график на рис. 2.95, б, из которого видно, что наименьшие как массовый (кривая 1), так и линейный (кривая 2) износы деталей наблюдаются в данных условиях истирания при значениях $F_n = 54...73$ %.

Данные лабораторно-стендовых испытаний хорошо согласуются с результатами испытания деталей с алмазным выглаживанием (пальцы, валы) в изделиях. Результаты испытания деталей компрессора (по данным В.М. Торбило) представлены в табл. 2.33.

Таблица 2.33

**Показатели износа деталей компрессора,
обработанных резанием и ППД**

Деталь	Износ деталей, мкм		Износ деталей, обработанных ППД, по сравнению с деталями без ППД, %
	с обработкой ППД	без обработки ППД	
Поршневой палец	7.5	5	65
Втулка верхней головки шатуна	7.5	5	93
Коленчатый вал (сальниковая шейка)	27.0	15	55

Из табл. 2.33 следует, что алмазное выглаживание уменьшает износ деталей в среднем на 35...40 %. Можно отметить, что уменьшается износ не только пальцев, обработанных алмазным выглаживанием, но и сопряженных с ними втулок верхней головки шатуна.

Использование результатов изложенных выше исследований на предприятиях позволило обеспечить годовой экономический эффект за счет повышения износостойкости и снижения трудоемкости изготовления деталей, в том числе стальных колонок и скалок — 9,6 тыс. руб., калибров — пробок — 3,8 тыс. руб., деталей микроэлектромашин автоматики и приборов — 21,1 тыс. руб., деталей станков — 12,7 тыс. руб. (данные соответствуют уровню цен 1989 г.).

2.4.5. Противозади́рность и сопротивление схватыванию

Испытание на схватывание цилиндрических поверхностей может производиться с помощью установки и тензорезисторного устройства (см. рис. 2.92). За критерий оценки сопротивления задирам и схватыванию принято давление P , колодки на образец, при котором возникает схватывание поверхностей.

Для испытания изготовлены образцы деталей из сплава ВТ1-1, которые по наружной цилиндрической поверхности диаметром 25 мм были обработаны резанием с $Ra = 0,32...0,63$ мкм ($F_{оп} = 0,1...0,91$ %) и ППД ($d_{ш} = 9,5$ мм; $P = 300$ Н). Колодки изготавливались из стали 45 (твёрдость 46...49 HRC, $Ra_{ср} = 0,8$ мкм). Результаты исследования большой группы образцов представлены в табл. 2.34.

Таблица 2.34

Сопротивление поверхностей титановых деталей с различной обработкой схватыванию

Способ обработки образцов, разновидность поверхности	Давление схватывания, МПа	
	минимальное	максимальное
Шлифование, разновидность 5	0,203	0,247
Точение, разновидность 4	0,237	0,262
Обкатывание, разновидность 0	0,291	0,343
Виброобкатывание, разновидность 0	0,266	0,278

Наилучшей обработкой по сопротивлению поверхностей титановых сплавов схватыванию для принятых условий (скорость относительного перемещения $v = 10$ м/мин) испытания являются обкатывание и виброобкатывание. Если принять сопротивление схватыванию шлифованной поверхности за 1, то сопротивление схватыванию обточенной поверхности составит 1,11, виброобкатанной — 1,21, а обкатанной — 1,41.

Для дальнейшего испытания на сопротивление наружных цилиндрических поверхностей титановых сплавов схватыванию были изготовлены образцы деталей из сплава ВТ1-1 диаметром $D_s = 37$ мм, обработанные точением с обеспечением $Ra_{ср} = 1,6; 0,8; 0,4; 0,2$ мкм и последующим виброобкатыванием шаром $d_{ш} = 5,6$ мм (ЧРМР, вид 3, $P = 250$ Н, $S = 2$ мм/об, $n_s = 16...282$ об/мин, $n_{дв.х} = 2900$ мин⁻¹, $2A = 1,6$ мм). Испытание производилось на установке (см. рис. 2.92)

с использованием колодок из стали 45 (твердость 41 HRC, $Ra_{cp} = 0,63...1,25$ мкм).

На рис. 2.96, а показана зависимость давления схватывания P_r вибробкатанных образцов из сплава ВТ1-1 с Ra_{cp} 0,8 и 0,2 мкм от относительной площади F_n . Оптимальными значениями F_n в отношении сопротивления схватыванию являются: $F_n = 72...88$ % для $Ra_{cp} = 0,2$ мкм и $F_n = 59...80$ % для $Ra_{cp} = 0,8$ мкм.

Рисунок 2.96, б иллюстрирует зависимость давления схватывания P_r вибробкатанной поверхности (ЧРМР, вид 3, $F_n = 58,5$ %) сплава ВТ1-1 от величины Ra исходной обточенной поверхности. При данном значении F_n уменьшение значения Ra_{cp} с 1,6 до 0,2 мкм приводит к возрастанию давления схватывания P_r с 0,123 до 0,156 МПа, а значит, и к повышению сопротивления поверхностей титана схватыванию.

Для испытания на схватывание наружных цилиндрических поверхностей сплава ВТ1-1 (колодки — сталь 45, 41 HRC) с оксиди-

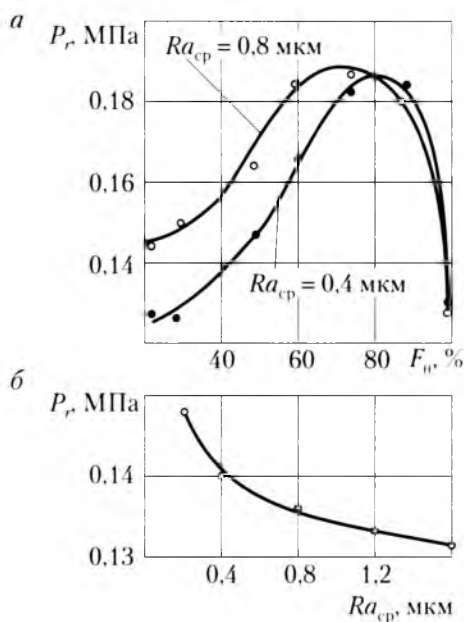


Рис. 2.96. Зависимость давления схватывания от относительной площади F_n (а) и среднего арифметического отклонения профиля Ra (б)

рованием при вакуумном отжиге и без химико-термической обработки изготовлены образцы с шероховатостью поверхности $Ra_{\text{ср}} = 0,2$ мкм, обработанные тремя способами: обтачиванием, обкатыванием ($P = 500$ Н; $d_{\text{ш}} = 15$ мм; $S = 0,11$ мм/об; $n_3 = 500$ мин⁻¹) и виброобкатыванием (ПРМР, разновидность 0). Испытание проводилось без смазывания образцов и колодок. Результаты испытания сведены в табл. 2.35.

Таблица 2.35

**Сопротивление титановых деталей
с вакуумным оксидированием схватыванию**

Способ обработки образцов	Давление схватывания, МПа		
	без оксидирования	с оксидированием	
		Толщина слоя 17 мкм	Толщина слоя 19 мкм
Точение (разновидность 4)	0,070	0,144	0,348
Обкатывание (разновидность 0)	0,129	0,183	0,372
Виброобкатывание (разновидность 0)	0,103	0,175	0,364

Анализ результатов испытания на схватывание обработанных ППД образцов деталей в термически необработанном и термически обработанном (вакуумный отжиг) состоянии показывает, что повышение сопротивления схватыванию при отделочной обработке титановых сплавов ППД обеспечивается ориентировочно на 30,8...45,8 % вследствие изменения физико-химических и на 69,2...54,2 % вследствие изменения геометрических параметров качества поверхности.

Из большого числа дальнейших экспериментов заслуживают внимания комбинированная обработка резанием, ППД и электролитическим сульфидированием (толщина сульфидной пленки 0,011...0,013 мм). Для испытания были изготовлены образцы из сплава ВТ1-1 в виде втулок с различной обработкой наружной поверхности, $D_3 = 35$ мм.

Наиболее высокое сопротивление схватыванию имеют поверхности, обработанные обкатыванием (шероховатость $Ra_{\text{ср}} = 0,2$ мкм, разновидность 0). В целом комбинированная обработка ППД с последующим электролитическим сульфидированием повышает сопротивление титановых сплавов схватыванию на 10,3 %.

Далее выявлялось влияние электролитического сульфидирования рабочей поверхности 2-го элемента пары трения (деталей, оправок и контрольных калибров (пробок)) на схватывание поверхностей титановых сплавов. Установлено, что электролитическое сульфидирование стальных закаленных поверхностей (сталь У8) приводит к повышению сопротивления титановых поверхностей схватыванию в среднем на 120 %, или в 2,2 раза.

Чаши гиросприборов (бронза БрО8С12) с расточенной сферической поверхностью обладают недостаточным сопротивлением образованию задиров. Для сопоставления противозадирности испытывались чаши с различным микрорельефом рабочей поверхности, получаемым в результате применения разных способов обработки и изменения подачи S при раскатывании шаром. Профилограммы профиля поверхностей представлены на рис. 2.75.

Критерием сопротивления рабочих поверхностей задирам принято количество посадок шара-ротора на технологическом вибростенде до появления рисок и задиров, при которых опоры выбраковываются. Результаты испытания на сопротивление опор образованию задиров приведены в табл. 2.36.

Таблица 2.36

**Антизади́рные свойства аэродинамических опор (чаш)
с различной обработкой**

Номер группы чаш	Профилограмма (см. рис. 2.75) и разновидность поверхности	R_z , мкм	$F_{оп}$, %	Среднее количество посадок ротора до выбраковки чаш
1	д, 4	1,2	0,31	2,0
2	з, 3	1,1	0,43	2,5
3	а, 2	1,0	0,73	3,6
4	в, 0	0,9	3,3	8,0
5	б, 0	1,1	4,2	9,0

По мере возрастания опорной поверхности с 0,31 до 4,2 % сопротивление рабочей поверхности образованию задиров возрастает. Максимальное количество посадок наблюдается у опор 5-й группы. Значительное улучшение антизади́рных свойств рабочих поверхностей опор можно объяснить изменением как параметров

шероховатости, так и характеристик состояния подповерхностного слоя материала чаши.

Использование результатов исследований в производстве позволило исключить случаи схватывания поверхностей титановых деталей микроэлектромашин автоматики при контроле и сборке-разборке изделий, повысить в 4 раза и более антизадирные свойства чаш гироскопов, значительно сократить брак деталей и изделий и обеспечить экономический эффект более 110 тыс. руб. (уровень цен 1989 г.).

2.4.6. Снижение загрязненности деталей, соединений, изделий

Снижение уровня загрязненности рабочих поверхностей прецизионных деталей из пластичных и вязких материалов обеспечивается исключением абразивной обработки (шлифования, доводки, полирования), отсутствием в подповерхностном слое открытых пор и раковин, обработкой без СОЖ или с быстро испаряющимися жидкостями, не оставляющими на поверхности твердого осадка (налета) при испарении, отделкой поверхностей деталей в помещениях с повышенными чистотой воздуха и культурой производства.

При абразивных процессах наблюдается шаржирование поверхности продуктами обработки [5, 7, 9, 15]. С.И. Шальман исследовал шаржирование поверхности деталей гироскопов и загрязнение подповерхностного слоя материала твердыми частицами предложенным им люминесцентным способом. Установлено отрицательное влияние шаржирования на работу гироскопов и других прецизионных изделий.

Выявлено влияние открытых пор и раковин подповерхностного слоя материала деталей и их покрытий на уровень загрязненности поверхностей при абразивной обработке [6–9]. Установлено, что при шлифовании шкуркой корпусов аппаратуры в открытые поры и раковины металла [АК9 (АЛ4)] набиваются твердые частицы в виде осколков абразива и металла; при местном полировании чаш гироскопов открытые поры оказываются заполненными продуктами обработки (пастами, частицами металла); при доводке деталей демпфера в поры химического никелевого покрытия попадают паста, снятый шлам, частицы осажденного никеля;

при шлифовании пакетов магнитопроводов продуктами обработки загрязняются зазоры между пластинами и размещенные в них бумажные прокладки.

Загрязнение рабочих поверхностей и подповерхностного слоя материала прецизионных деталей приводит к загрязнению сборочных единиц и способствует появлению в зазорах прецизионных подвижных соединений большого количества продуктов изнашивания, снижению чувствительности и точности работы прецизионных изделий, ухудшению адгезии слоя покрытия к основному металлу деталей и магнитоэлектрических свойств материалов, снижению коррозионной стойкости деталей и другим негативным явлениям.

Очевидны положительные стороны применения отделочной обработки ППД, при которой отсутствует загрязнение поверхностей, закатываются мелкие раковины и поры материала, исключаются впадины неровностей с малыми радиусами округления, в которых могут скапливаться и долго сохраняться различные загрязнения. Кроме того, обработка ППД в случае необходимости может осуществляться без СОЖ. Все это уменьшает производственное загрязнение в 10 раз и более.

Помимо производственного загрязнения, поверхности прецизионных деталей и зазоры соединений могут загрязняться в процессе эксплуатации. В этом плане необходимо повышать износостойкость деталей и соединений и исключать появление большого количества продуктов изнашивания при приработке и эксплуатации пар трения. Одним из путей снижения уровня загрязненности деталей и соединений в процессе эксплуатации также является обработка ППД, которая обеспечивает рабочие поверхности разновидности 0 с пологими микронеровностями и большими радиусами их округления, приводит к упрочнению подповерхностного слоя материала и этим улучшает прирабатываемость и износостойкость деталей.

При испытании пары трения из материалов деталей гироскопов полукольцо (БрО8С12) с $Ra = 0,31$ мкм — вал (ШХ15, обработка обтачиванием — разновидность 4 и виброобтачиванием в режиме создания ПРМР — разновидность 0) с $Ra = 0,16$ мкм были получены разные время приработки и приработочный износ. Если при обработке деталей обтачиванием время приработки составило

13...16 мин, а приработочный износ — 5,5 мг, то время приработки виброобкатанных образцов — 6,5 мин, износ — 2 мг. Таким образом, обработанные ППД поверхности прирабатываются в два раза быстрее и с меньшим приработочным износом, что снижает уровень эксплуатационной загрязненности зазоров прецизионных подвижных соединений.

Сопоставление количества продуктов изнашивания пар демпфера автоматов глубины, детали которых из латуни ЛС59-1 (цилиндр) и Л63 (поршень) обрабатывались по слою химического никелевого покрытия способами резания и ППД четырех сочетаний, также показало существенные преимущества обработки ППД (рис. 2.97). Из графика следует, что при 12,375 тыс. циклов истирания суммарное количество продуктов изнашивания составило: для 1-го сочетания — 6,94 мг, для 2-го — 4,8 мг, для 3-го — 4,17 мг, для 4-го — 2,75 мг.

Испытание проводилось без смазывания пары трения. Рабочие поверхности деталей были обработаны в соответствии с чертежами с $Ra = 0,08...0,16$ мкм. Алмазное выглаживание осуществлялось до термообработки покрытия алмазным наконечником ($r_c = 2$ мм; $P = 20$ Н; $S = 0,05$ мм/об; СОЖ — костное масло). Количество загрязнений в виде продуктов изнашивания в паре трения с деталями, обработанными ППД, снижается по сравнению с парами деталей, рабочие поверхности которых обработаны доводкой, в 2,5 раза.

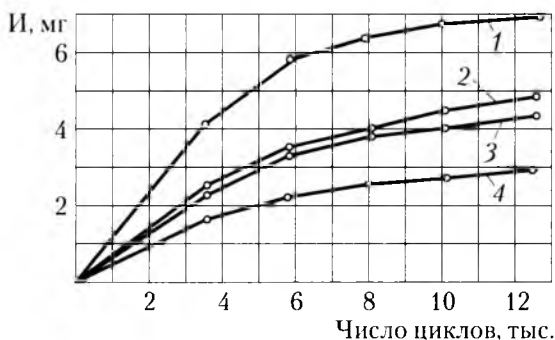


Рис. 2.97. Зависимость количества загрязняющих продуктов изнашивания демпферной пары от циклов истирания и сочетания обработки: 1 — доводка; 2 — цилиндр — доводка, поршень — алмазное выглаживание; 3 — цилиндр — выглаживание, поршень — доводка; 4 — алмазное выглаживание

Таким образом, уровень загрязнения поверхностей деталей при их изготовлении в процессе эксплуатации можно уменьшать в 10 раз и более, зазоров подвижных соединений в процессе эксплуатации — в 2–3 раза, что достигается созданием рабочих поверхностей разновидности 0 и других факторов, обеспечиваемых образованием ПРМР и обработкой ППД.

2.4.7. Магнитоэлектрические свойства деталей и соединений

Определенные технологические трудности возникают при обработке деталей магнитопроводов малогабаритных следящих трансформаторов (МСТ) АДС-507, сельсинов и других микроэлектромашин автоматики. Так, МСТ состоит из статора и ротора. Статор выполнен в виде трансформатора, набранного из Ш-образных пластин (пакет статора), ротор — в виде сегментного пакета (пакет ротора). Пакеты ротора и статора набираются из пластин железоникелевого сплава 50Н толщиной 0,35 мм, крайние пластины имеют толщину 0,5 мм (рис. 2.98).

Одним из основных требований, предъявляемых к пакетам МСТ, является отсутствие замыкания пластин между собой. По типовой технологии пакет ротора по наружной и пакет статора по внутренней цилиндрическим поверхностям диаметром 80 мм (квалитет точности 7) обрабатывались шлифованием. При шлифовании возникает замыкание пластин между собой. Никакие дополнительно вводимые операции «прорезания» и разделения замкнутых пластин не приводили к желаемому результату. Причиной низкого качества пакетов являлось не только замыкание за счет наволакивания металла одной пластины на другую под действием шлифовального круга, но и ухудшение электромагнитных свойств самих пластин в результате высоких контактных температур в зоне шлифования и загрязнения подповерхностного слоя металла абразивными частицами шлифовального круга, что значительно снижает магнитные характеристики ротора и статора. При обработке пакетов МСТ шлифованием нельзя также применять СОЖ, так как она способствует разрушению изоляционных прослоек (бумага, лак) между пластинами.

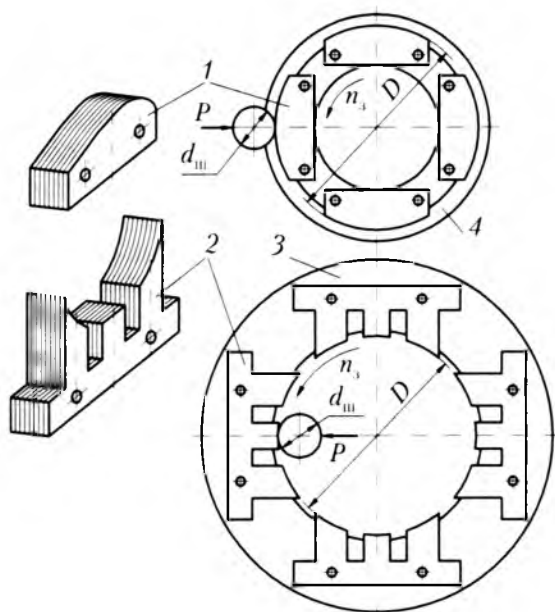


Рис. 2.98. Детали МСТ и схемы их обработки ППД:
1 — пакет ротора; 2 — пакет статора; 3 — планшайба; 4 — оправка

Объемная холодная пластическая деформация в значительной степени ухудшает магнитные свойства металла, при этом возрастает коэрцитивная сила и снижается магнитная проницаемость. Поверхностное пластическое деформирование, применяемое при отделочной обработке, в значительно меньшей степени изменяет магнитные свойства материала, что объясняется малой толщиной деформированного подповерхностного слоя. Так, для получения микрогеометрии с $Ra = 0,16...0,32$ мкм наружной поверхности сегментного пакета ротора и внутренней — пакета статора МСТ (см. рис. 2.98) рекомендуется принимать $P = 50...100$ Н и $d_{III} = 7...10$ мм. При этом создается упрочненный слой толщиной всего 19...26 мкм, степень упрочнения при повышении микротвердости с исходного значения H_{μ} 33 до 37,5 ($P = 50$ Н) и до 42 ($P = 100$ Н) составляет 12,6...27,3 %.

В соответствии с новым техпроцессом пакеты МСТ обрабатываются на оправке (см. рис. 2.98) и планшайбе по четыре штуки

с установкой заготовок деталей на плоскость и на два пальца по отверстиям. Условия и параметры режима обработки следует выбирать по приведенному ниже регламенту.

В результате исследований установлено, что обработка пакетов за одну установку обтачиванием наружных и растачиванием внутренних цилиндрических прерывистых поверхностей деталей МСТ с $Ra = 1,25 \dots 2,5$ мкм и последующим обкатыванием шаром обеспечивает поверхности с $Ra = 0,16 \dots 0,63$ мкм и практическое отсутствие замыкания пластин между собой. На рис. 2.99 показаны поверхности пакетов ротора после отделочной обработки шлифованием (а) и обкатыванием шаром (б). У шлифованных пакетов наблюдается замыкание пластин между собой. Следует осуществлять обработку ППД путем прецизионной настройки и без СОЖ.

Магнитные свойства пакетов с обработкой ППД значительно лучше, чем у обработанных шлифованием. Установлено, что магнитная асимметрия (различная магнитная проводимость пакета в разных сечениях) деталей, обработанных точением с последующим обкатыванием (раскатыванием) шаром, оказалась в среднем на 30 % меньше, чем асимметрия шлифованных деталей.

Использование в производстве отделочной обработки поверхностей пакетов ППД позволило практически исключить замыкание пластин между собой, повысить производительность чистовой обработки по сравнению со шлифованием в 1,5 раза и снизить брак деталей с 40...43 % до 0...3 %.

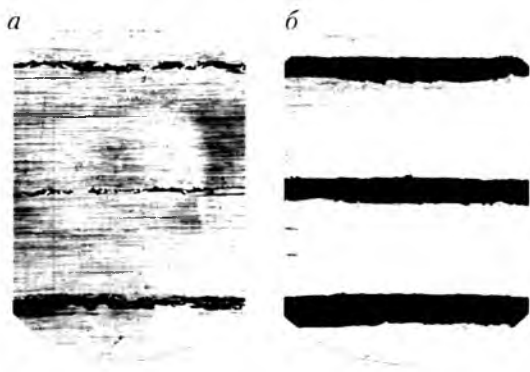


Рис. 2.99. Поверхности пакетов якоря МСТ, обработанные шлифованием (а) и обкатыванием (б). Увеличение $\times 110$

Критерием оценки изменения электрических свойств титановых деталей микроэлектромашин приняты удельное электрическое сопротивление ρ и температурный коэффициент омического сопротивления α_c . Для испытания из отожденного титанового сплава были изготовлены образцы в виде колец с внутренним и наружным диаметрами соответственно 45,1 и 46,1 мм (толщина стенки $h_c = 0,5$ мм) и шириной $b_0 = 7$ мм. Кольца по наружной поверхности обрабатывались на оправке точением, шлифованием, обкатыванием шаром ($d_{ш} = 15$ мм; $P = 100$ и 200 Н; $S = 0,097$ мм/об; $n_p = 800$ мин⁻¹) и виброобкатыванием ПРМР при приведенных выше параметрах режима с $n_{дв.х} = 2600$ мин⁻¹, $2A = 2$ мм.

Определение электросопротивления разрезанных образцов производилось с помощью двойного моста Р-329 с зеркальным гальванометром М-17/4. Нагрев образцов осуществлялся в термостате У-10, наполненном кремнийорганической жидкостью Ж-5. К моменту измерения образец находился в термостате не менее 10 мин.

Электросопротивление образцов с различной обработкой для температур от 273 до 423 К приведены в табл. 2.37. По данным этой таблицы и фактическим значениям площадей поперечного сечения образцов с различной обработкой при активной их длине $L_k = 0,122$ м определены значения удельного электросопротивления ρ для всех значений температуры.

Таблица 2.37

Электросопротивление образцов при различных температурах, Ом

Способ обработки и сила P поджима инструмента	Температура, К						
	273	293	323	343	363	393	423
Точение	0,01578	0,01705	0,01905	0,02023	0,02162	0,02350	0,02537
Шлифование	0,01585	0,01713	0,01917	0,02034	0,02170	0,02358	0,02542
Обкатывание, $P = 100$ Н	0,01625	0,01755	0,01954	0,02082	0,02217	0,02413	0,02602
Виброобкатывание, $P = 100$ Н	0,01760	0,01901	0,02131	0,02273	0,02423	0,02632	0,02823
Обкатывание, $P = 200$ Н	0,01589	0,001718	0,01917	0,02045	0,02177	0,02365	0,02560
Виброобкатывание, $P = 200$ Н	0,01805	0,01952	0,02174	0,02323	0,02465	0,02685	0,02899

Анализ полученных результатов показал, что шлифование, обеспечивающее некоторую деформацию подповерхностного слоя сплава (по микротвердости на глубину 14,4 мкм), приводит к повышению удельного сопротивления по сравнению с точением на 3,0...3,5 %; обкатывание и виброобкатывание с силой $P = 100$ Н приводят к повышению удельного электросопротивления соответственно на 4...4,5 % и 6,5...7 %, а обкатывание и виброобкатывание с силой $P = 200$ Н повышают величину ρ соответственно на 7,5...8 % и 11 %.

Исследованиями установлена практическая неизменность температурного коэффициента омического сопротивления тонкостенных ($h_c = 0,5$ мм) колец из сплава ВТ1-1, обработанных резанием и ППД. Так, в интервале температур 273...293 К значение α_c колец с различной обработкой сохраняется в пределах 0,00400...0,00407.

При увеличении толщины стенок деталей отделочная обработка ППД при тех же показателях упрочнения подповерхностного слоя материала обеспечивает практически неощутимые изменения удельного сопротивления ρ и температурного коэффициента омического сопротивления α_c .

Параметры режима обработки деталей подвижных контактов микроэлектромашин — коллекторов с пластинами из меди М1 с родиевым покрытием и щеток из бронзы БрБ2 следует выбирать по регламенту. Коллектор обрабатывается обкатыванием шаром до покрытия (после предварительного обтачивания) и алмазным выравниванием после покрытия родием. При этом выдерживаются параметры поверхности: $Ra_{cp} = 0,2$ мкм, $r = 0,5...0,8$ мкм, $r/R_{max} = 350...380$, $F_{оп} = 2,4...3,8$ %, разновидность 0; ПРМП с обеспечением $R_{max} \geq R_z$, отсутствует загрязнение поверхностей, повышается адгезия слоя покрытия с основным металлом, возрастает износостойкость деталей. Щетки обрабатываются с выдерживанием $Ra_{cp} = 0,4$ мкм (по чертежу 0,2 мкм); $r = 0,08...0,12$ мм; $F_{оп} = 0,2...0,32$ %; разновидность 1 с $h_n = 0$; $N_n \leq 80$ ПН/мм² (для обычных условий эксплуатации) и разновидность 4 с $h_n = 0,4...0,6$ мкм; $N_n = 220...260$ ПН/мм² (для работы в условиях повышенной влажности и газовыделений). Необходимость рабочей поверхности щеток с ПН обусловлена требованием обеспечения надежного электроконтактирования и снижения переходного электросопротивления контакта коллектор — щетка в условиях длительного хранения приборов и периодической их кратковременной работы.

Испытаниями микроэлектромашин автоматики установлено, что переходное электросопротивление подвижного контакта при обеспечении приведенных выше параметров микрогеометрии поверхностей снижается в среднем на 25 %. При этом подтверждена высокая износостойкость коллектора и не обнаружено отрицательного влияния на переходное электросопротивление упрочнения подповерхностного слоя толщиной $h_{\sigma} = 0,012$ мм (степень упрочнения 22 %). Поверхности с ПН придают щеткам подчищающие свойства и способность проникать к поверхности коллектора через загрязнения и инородные пленки, появляющиеся в период хранения микроэлектромашин, особенно в условиях повышенной морской влажности и газовыделений. В целях снижения контактного электросопротивления шероховатость рабочей поверхности щеток снижена с $Ra_{\text{ср}} = 0,2$ мкм (по чертежу) до $Ra_{\text{ср}} = 0,4$ мкм.

2.4.8. Чувствительность сдвига и плавность перемещения деталей в соединениях

Особенно высокие требования по чувствительности сдвига и плавности перемещения предъявляются к деталям прецизионных пар трения приборов, станков, аппаратов, гидроприводов телескопического типа. Хорошая плавность хода достигается, как правило, высокой точностью деталей и тщательностью отделочной обработки их рабочих поверхностей.

При работе маятникового устройства в блоках стабилизации глубины (БСГ) требуется повышенная чувствительность (легкость) сдвига и плавность перемещения поршня в цилиндре в условиях работы демпфера без смазывания. Зона нечувствительности БСГ по дифференту должна быть не более 1° при дифференте около 0. Установлено, что при потере чувствительности БСГ на рабочих поверхностях деталей с химическим никелевым покрытием имелись глубокие продольные риски в пределах 1,25...2,5 мкм, а в зазоре между поршнем и цилиндром демпфера наблюдалось значительное количество загрязняющих продуктов (металлическая пыль, остатки пасты, другие загрязнения).

После изучения состава продуктов выяснилось, что причиной появления в зазоре пары доводочной пасты и других производственных загрязнений являются поры покрытия, а металлическая

пыль и частицы шлама (загрязнения покрытия) являются следствием микрорезания поверхностей с поднутренными и другими заостренными неровностями, возникающими при доводке.

В результате воздействия вибрации при транспортировании изделий производственные загрязнения из пор покрытия деталей попадают в зазор подвижного соединения. «Наскабливание» металлической пыли и шлама покрытия происходит при перемещении поршня в цилиндре. Загрязнение зазора приводило к потере легкости сдвига и плавности перемещения, увеличению зоны нечувствительности БСГ больше пределов, указанных в ТУ.

Результаты испытания на чувствительность БСГ, в которых установлены детали, обработанные доводкой и ППД, приведены в табл. 2.38.

В БСГ № 1 и 2 установлены цилиндры, обработанные выглаживанием алмазным наконечником ($r_c = 2$ мм, $P = 10...20$ Н) до и после покрытия, в БСГ № 3 и 4 — только после покрытия. Рабочая поверхность цилиндров с $Ra = 0,16...0,32$ мкм. Цилиндры в БСГ № 5 и 6 обработаны доводкой с $Ra = 0,08...0,16$ мкм. Из табл. 2.38 следует, что демпферы БСГ № 1...4 имеют значительно лучшую легкость сдвига и плавность перемещения по сравнению с демпферами БСГ № 5 и 6. Увеличение шероховатости обработанных ППД поверхностей является положительным с точки зрения обеспечения карманов для западания продуктов приработки деталей демпфера.

Таблица 2.38

**Чувствительность БСГ после проверки работы
на вибростенде по дифферену**

Цикл	Номер БСГ и цилиндров (условно)					
	1	2	3	4	5	6
0	40'	50'	50'	40'	45'	45'
1	40'	50'	50'	45'	55'	50'
2	45'	55'	50'	45'	1°20'/55'	55'
3	50'	45'	45'	45'	1°20'/55'	55'
4	40'	55'	40'	50'	55'	55'
5	45'	55'	50'	50'	55'	1°

Примечание. Цикл 0 соответствует уровню чувствительности приборов перед проверкой. В циклах 2, 3 для БСГ № 5 в числителе показана зона нечувствительности по дифферену при первом испытании, в знаменателе — при повторном испытании демпфера после промывки деталей.

Испытания БСГ проводились на вибростенде при вибрации с частотой $f_b = 50$ Гц, амплитудой $2A = 0,2$ мм, перегрузкой $2g$ в течение 5 циклов по 6 ч каждый, что соответствует экстремальным условиям работы изделий.

Вследствие применения отделочно-упрочняющей обработки ППД на Гомельском заводе сельскохозяйственного машиностроения успешно решена задача обеспечения легкости сдвига, плавности перемещения и улучшения других эксплуатационных свойств опрокидывающего цилиндра тракторного прицепа 2ПТС-4. Опрокидывающий цилиндр телескопического типа состоит из четырех стальных труб (сталь 35, твердость 187 НВ). При обработке рабочих поверхностей резанием наблюдалось заклинивание цилиндра и схватывание поверхностей.

Накатывание роликами с помощью многоинструментальных приспособлений осуществляется с параметрами режима обработки: $S = 0,3$ мм/об; $n_3 = 375$ мин⁻¹. При этом обеспечивается уменьшение шероховатости внутренних поверхностей с $Ra = 2...4$ до $Ra = 0,32...0,63$ мкм (разновидность 0); наружных — с $Ra = 0,63...1,25$ до $Ra = 0,08...0,16$ мкм (разновидность 0).

С внедрением отделочно-упрочняющей обработки ППД повысилась легкость сдвига, плавность перемещения и герметичность телескопических гидроцилиндров. В результате упрочнения металла исключены случаи вздутия труб, благодаря созданию оптимальной микрогеометрии рабочих поверхностей устранены заклинивание опрокидывающих цилиндров и схватывание рабочих поверхностей труб.

Применение прогрессивной технологии в производстве позволило повысить качество продукции и обеспечить значительный экономический эффект. Так, до перехода на новую технологию обработки деталей демпфера каждый второй БСГ возвращался на предприятие с рекламацией (потеря чувствительности). После использования обработки ППД в течение всех последующих лет такие случаи не наблюдаются. Обеспечен экономический эффект, превышающий 20 тыс. у.е.

2.4.9. Ламинарность перемещения газов в зазорах соединений и кумулятивность

Приобретенные после обработки ППД характеристики поверхности и подповерхностного слоя материала чаши стали основой создания аэродинамической опоры с совершенно новыми свойствами (А.с. СССР 741632).

Обработка ППД внутренних сферических поверхностей чаши может производиться на токарно-винторезных станках по показанной на рис. 2.100 схеме посредством устройства с использованием малогабаритных шаровой и алмазной головок. Обработку ППД (рис. 2.100, *а*) рекомендуется производить за один установ сразу же после растачивания заготовки 2, устанавливаемой в оправку 1. Движение подачи головке 17 сообщается при повороте стола 16 червячной парой. Вращение червячной шестерне, соединенной со столом 16, передается от ходового валика 12 с помощью ременной передачи, редуктора 8 и валика 7. Настройка устройства на обработку осуществляется при снятом валике 7 маховиком 6, соединенным с валом червяка. Установку вылета головки 17 можно производить с помощью винтовой пары и маховика 4. Контроль вылета головки осуществляется по шкале маховика, а поворота стола — по шкале 5. Для исключения завалов кромок заготовки следует после касания инструмента к обрабатываемой поверхности осуществлять прецизионную настройку на обработку, суть которой изложена далее.

Описанное устройство после модернизации позволяет осуществлять виброраскатывание и вибровыглаживание внутренних сферических поверхностей. Для этого инструментальная каретка 3 (см. рис. 2.100, *а*) размещается на вспомогательном столе, устанавливаемом на основном столе 16 с возможностью реверсивного (колебательного) поворота вокруг оси своего хвостовика. Вся поворотная система монтируется на столе, который в процессе обработки за счет поворота обеспечивает подачу инструмента, а вспомогательный стол при этом совершает еще и колебательное движение относительно оси своего хвостовика в направлении подачи и обратном ему. Колебательное движение головки 17 обеспечивается посредством соединенного с хвостовиком вспомогательного стола рычага, вертикально установленного на соединенной с основным столом

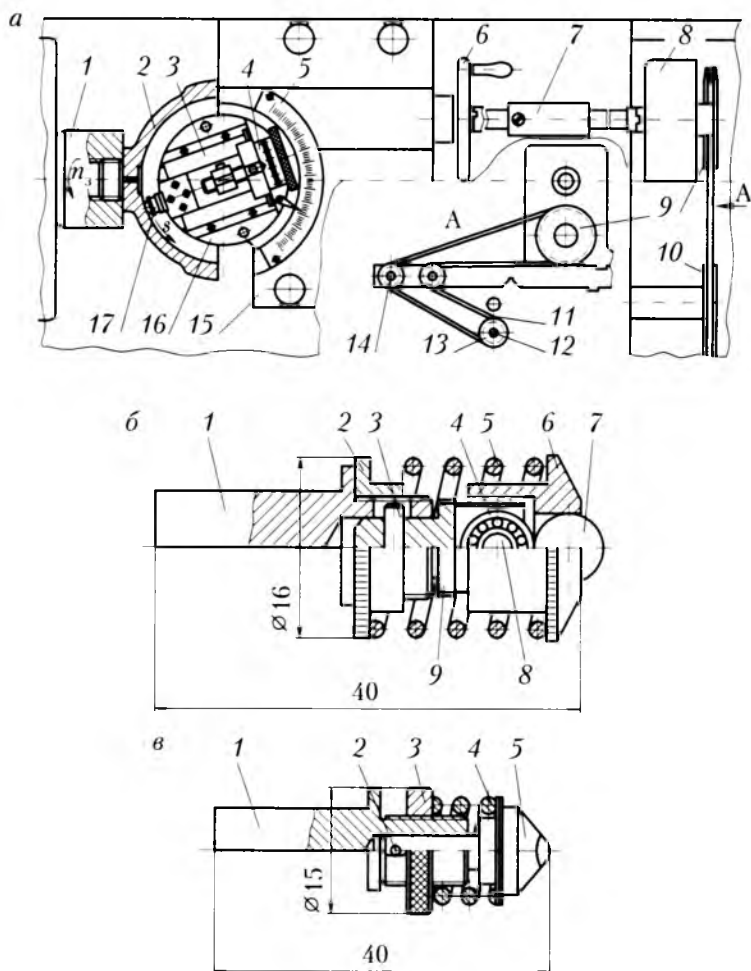


Рис. 2.100. Схема комбинированной обработки чаш с помощью прецизионного устройства:

а — конструкция устройства: 1 — оправка; 2 — заготовка; 3 — инструментальная каретка; 4 — маховик перемещения инструмента; 5 — шкала; 6 — маховик-настройки; 7 — валик регулируемый; 8 — редуктор; 9, 10, 13, 14 — шкивы; 11 — ремень; 12 — ходовой валик станка; 15 — основание; 16 — стол; 17 — головка малогабаритная; *б* — шаровая малогабаритная головка: 1 — корпус; 2 — гайка; 3 — штифт; 4 — шарикоподшипник; 5 — пружины; 6 — втулка-сепаратор; 7 — шар; 8 — ось; 9 — вилка; *в* — алмазная малогабаритная головка: 1 — корпус; 2 — штифт; 3 — гайка; 4 — пружина; 5 — алмазный наконечник

подставке электродвигателя и эксцентрика на его валу. Электродвигатель мощностью 90 Вт имеет разные частоты вращения вала, что обеспечивает виброраскачивание и вибровыглаживание сферической поверхности с разным числом двойных ходов инструмента. Амплитуда 2А колебания инструмента изменяется в случае необходимости путем перестановки на валу электродвигателя эксцентриков, входящих в паз рычага привода колебательного движения вспомогательного стола устройства.

Малогабаритные шаровая и алмазная головки устанавливаются в устройство вместо расточного резца. Шар 7 шаровой головки (см. рис. 2.100, б) располагается во втулке-сепараторе 6, опирается на цилиндрическую поверхность шарикоподшипника 4 и в процессе обработки поджимается к обрабатываемой поверхности с силой, создаваемой предварительно сжатой гайкой 2 тарированной пружиной 5. Вилка 9 направляющим хвостовиком входит в отверстие корпуса 1 и свободно перемещается в пределах хода штифта 3 в пазу корпуса.

В качестве деформирующего элемента алмазной головки (рис. 2.100, в) используются алмазные наконечники с радиусом сферы $r_c = 1,5...4,0$ мм. Наконечник 5 своим обточенным под меньший диаметр хвостовиком входит в отверстие корпуса и свободно перемещается в осевом направлении в пределах хода штифта в пазу корпуса. Необходимая сила выглаживания обеспечивается пружиной 4.

Изменение характеристик и свойств новой чаши-опоры можно наблюдать по данным табл. 2.39, выявленным в процессе исследований и испытания деталей и приборов.

Таблица 2.39

Характеристика новой и ранее существующей опор

Характеристика	Ранее существующая опора	Новая опора	Изменение характеристики новой опоры по сравнению с существующей
<i>Элементы конструкции</i>			
Форма поверхности выточки	Цилиндрическая	Коническая	Угол между образующей конуса и осью 10...12°

Продолжение табл. 2.39

Характеристика	Ранее существующая опора	Новая опора	Изменение характеристики новой опоры по сравнению с существующей
<i>Микрогеометрия поверхности</i>			
$R_{\max}$, мкм	2	1,67	Уменьшение на 16,5 %
σ_p , мкм	0,81	0,30	Уменьшение в 2,7 раза
r_{cp} , мкм	41	5000	Уменьшение в 122 раза
$r/R_{\max}$	20,5	3000	Уменьшение в 146 раз
α , град.	14,5	3,15	Уменьшение в 4,6 раза
γ , угл. мин	10	900	Уменьшение в 90 раз
$F_{оп}$, %	0,31	4,2	Уменьшение в 13,5 раза
Количество впадин круговых сечений	Переменное	Постоянное	Улучшение свойств
Сумма площадей впадин круговых сечений	Переменная	Постоянная	Улучшение свойств
Наличие ПН	Есть	Нет	Улучшение свойств
Разновидность поверхности	5	0	Улучшение свойств
<i>Физико-химические свойства подповерхностного слоя бронзы (BrO8C12)</i>			
Микротвердость H_u	210	275	Увеличение на 30 %
Степень упрочнения, %	21,1	56,1	Увеличение в 2,7 раза
Толщина упрочненного слоя h_{σ} , мкм	15,6	28,6	Увеличение в 1,8 раза
Наличие пор	Есть	Нет	Снижение загрязненности и улучшения свойств деталей

Окончание табл. 2.39

Характеристика	Ранес существующая опора	Новая опора	Изменение характеристики новой опоры по сравнению с существующей
<i>Эксплуатационные свойства</i>			
Коэффициент трения в паре опор — ротор	0.18	0.13	Уменьшение на 28 %
Противозадирность, число запусков-остановок до появления задиров	2	9	Увеличение в 4,5 раза
Движение газа в зазоре	Турбулентное	Ламинарное	Повышение работоспособности опоры и аэродинамического подвеса; улучшение качества и надежности гироскопических приборов
Давление газа в зазоре	Переменное	Постоянное	
Работа подвеса и прибора	Неспокойная с нестабильными показателями	Спокойная со стабильными показателями	

На рис. 2.101 показана новая опора и схема работы подвеса в аэростатическом (запуск прибора) и аэродинамическом (работа прибора) режимах. Равномерно-волнообразный микрорельеф рабочей поверхности обеспечивается вибровыглаживанием алмазным наконечником (вибораскатыванием шаром) в режиме, указанном в регламенте. В новой опоре цилиндрическая выточка заменена на коническую с углом наклона образующей $10...12^\circ$.

Рабочая поверхность опоры 2 имеет пологие обтекаемой формы микронеровности 3 в направлении движения паза в режиме эксплуатации гиросприбора. На развертках 4 круговых сечений А и Б видно, что микрорельеф поверхности имеет равные число и суммарную площадь впадин микронеровностей во всех круговых сечениях опоры, что достигается постоянным числом двойных ходов $n_{\text{дв.х}}$ инструмента при вибровыглаживании (вибораскатывании) сферической поверхности. Именно это условие обеспечивает одинаковое сопротивление движению газа, а значит, и равномерное давление во всех точках зазора δ_3 , что очень важно для запуска прибора, когда газ под давлением подается через отвер-

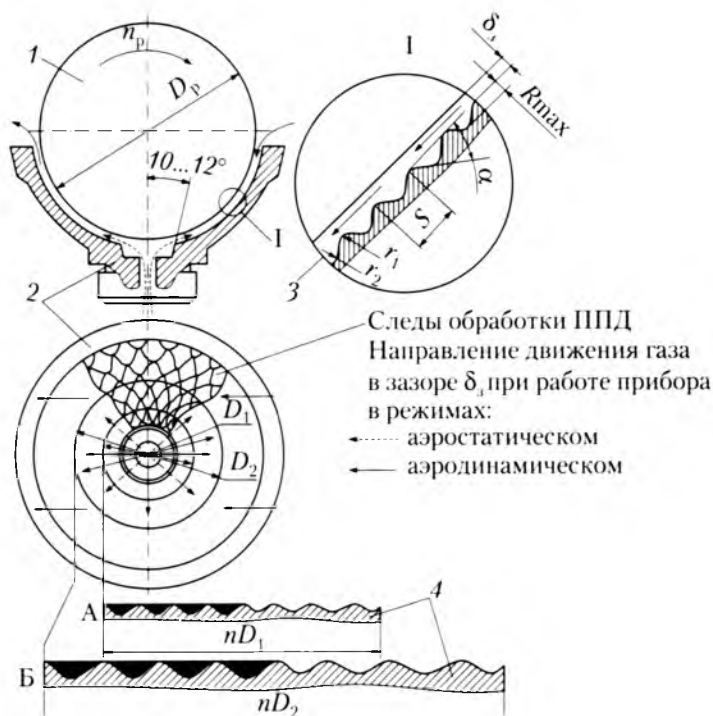


Рис. 2.101. Аэродинамическая опора с обработанной ППД рабочей поверхностью, ее характеристики и схема работы

стие и выточку опоры и в радиальных направлениях проходит через зазор. После достижения ротором частоты вращения 5000 мин^{-1} прибор переводится на аэродинамический режим работы подвеса, когда подъемная сила создается клиновым эффектом при нагнетании (самозатягивании) газа, например гелия, в зазор поверхностью вращающегося ротора. Скорость перемещения поверхности ротора ($D_p = 101 \text{ мм}$) относительно опоры в момент перевода подвеса на аэродинамический режим работы достигает 1586 м/мин и более. В аэродинамическом режиме работы газ в зазоре перемещается в направлении, перпендикулярном оси вращения ротора 1.

Ламинарность перемещения газа в малом зазоре δ_3 , значение которого $1...2 \text{ мкм}$, оценивалась по числу касаний ротора к рабочей поверхности опоры. Для испытания были изготовлены 10 опор (чаш) по старой технологии обработки сферической поверхности

и 10 — по новой. Все детали были установлены в гироприборы. Испытания осуществлялись на вибростенде при вибрации с частотой 50 Гц, амплитудой 0,3 мм, перегрузкой 3g в течение 5 циклов по 1 ч каждый. Указанный режим испытания в несколько раз превышает экстремальные условия эксплуатации изделий, что позволило сократить время испытания. Касания фиксировались электрическим способом, их число отмечалось счетчиком. При этом обеспечивались частоты вращения ротора: в аэродинамическом режиме работы $n_p = 7800 \text{ мин}^{-1}$, в аэростатическом $n_p = 4900 \text{ мин}^{-1}$. Результаты эксперимента сведены в табл. 2.40.

В условиях испытания все чаши, обработанные по старой технологии, кроме одной (прибор Т-5), забракованы после 4, 5, 6 циклов по несоответствию качества поверхности (задиры, риски) и требовали нерерасточки и зачистки шкуркой. Новые опоры с обработанной ППД поверхностью после всех циклов испытания соответствовали требованиям чертежа. Следует отметить, что среднее число касаний ротора с обработанными ППД чашами составляет 33,2, а с расточенными — 143,6, или в 4,2 раза меньше. Подобные результаты получены при испытании чаш в аэростатическом режиме работы подвеса гироприбора. Можно сделать следующие заключения:

1) новые чаши обеспечивают высокую степень ламинарности перемещения газа в зазоре и спокойную, стабильную работу аэродинамического подвеса;

2) они обладают высокими противозади́рными свойствами, что подтверждается более плавным возрастанием числа касаний ротора по сравнению с подвесами, оснащенными старыми чашами;

3) обеспечение разновидности 0 рабочей поверхности чаш (отсутствие ПН) снижает загрязненность зазора в процессе эксплуатации приборов за счет исключения загрязнений поверхности и подповерхностного слоя металла и выдувания их в зазор, а также разрушения (отрыва) ПН от поверхности детали потоком газа, что способствует также повышению точности работы прибора.

Наблюдениями установлена большая зависимость работы подвеса гироскопа от микрогеометрии рабочей поверхности сферического ротора. С одной стороны, ротор не должен отрицательно воздействовать своими неровностями на поверхность чаши при контактировании с ней, с другой — он должен обладать хорошей способностью самозатягивания газа в зазор подвеса при аэродина-

мическом режиме работы гиросприбора. Оптимальной признана поверхность разновидности 1, которая характеризуется наличием ПН, не превышающих по высоте уровень R_z .

По данным И.Д. Альтшуля и П.Г. Киселева, коэффициент аэродинамического сопротивления C_x тел сферической формы составляет в среднем 0,5, а тел с передней поверхностью в виде плоскости — 1,15. Можно считать, что значения C_x обтекаемой регулярной неровности и ПН примерно равны, соответственно 0,5 и 1,15. Силу P_c аэродинамического сопротивления неровностей потоку газа можно определить по формуле

$$P_c = C_x S_{\Pi} \rho_{\Pi} v^2, \quad (2.16)$$

где S_{Π} — площадь вертикального сечения; ρ_{Π} — плотность газа; v — скорость относительного перемещения.

Площадь $S_{\Pi, \text{ср}}$ для ПН ротора составляет 0,25 мкм². Скорость v перемещения поверхности ротора в аэродинамическом режиме при $n_p = 10\,000 \text{ мин}^{-1}$ составляет 52,8 м/с.

Таблица 2.40

Результаты испытания АШГ-100 с различными чашами

Технология обработки чаши	Номер прибора	Число касаний при циклах испытания						Общее число касаний	Цикл забраковывания чаши
		1	2	3	4	5	6		
Старая (рас- тачивание, зачистка шкуркой)	T-1	6	8	15	32	61	—	122	5
	T-2	9	18	31	67	—	—	125	4
	T-3	6	10	14	24	39	67	160	6
	T-4	7	9	17	35	63	—	131	5
	T-5	4	7	12	19	26	34	102	Не забракована
	T-6	6	9	16	28	42	68	169	
	T-7	5	8	15	33	69	—	130	
	T-8	7	10	18	32	44	72	183	
	T-9	7	11	18	36	71	—	143	
	T-10	6	8	16	29	48	66	171	
Новая (обра- ботка ППД)	T-11	1	3	5	8	11	16	44	Не забракована
	T-12	0	2	5	7	10	12	36	Не забракована
	T-13	0	1	4	7	9	16	37	
	T-14	0	1	3	6	8	10	28	

Окончание табл. 2.40

Технология обработки чаши	Номер прибора	Число касаний при циклах испытания						Общее число касаний	Цикл забраковывания чаши
		1	2	3	4	5	6		
	T-15	0	2	4	8	11	13	38	
	T-16	0	0	2	3	6	12	23	
	T-17	0	2	3	5	8	11	29	
	T-18	0	2	5	6	7	11	31	
	T-19	0	3	6	8	9	13	39	
	T-20	0	0	3	5	7	12	27	

В описанных условиях сила аэродинамического сопротивления P_c ПН, найденная по формуле (2.16), в 2,3 раза больше силы сопротивления обыкновенной регулярной неровности. Это предопределяет улучшение самозатягивающей способности ротора.

При создании рабочей поверхности разновидности 1 ротор обеспечивает работу подвеса в аэродинамическом режиме с частотой вращения $n_p = 3900 \text{ мин}^{-1}$, а при отсутствии ПН (разновидность 0) этот режим обеспечивается лишь с $n_p = 5000 \text{ мин}^{-1}$. Именно в этом проявилось улучшение самозатягивающей способности поверхности ротора.

Подобными объяснениями подтверждается ламинарность перемещения газа в зазоре при обеспечении рабочей поверхности чаши разновидности 0 и обтекаемости неровностей. Разрушение и отрыв ПН потоком газа от поверхности чаши можно обосновать действующей на каждую неровность силой P_c , которая в соответствии со средней площадью вертикального сечения ($1,5 \text{ мкм}^2$) одной поднутренной неровности в 6 раз превышает силу, действующую на одну неровность ротора. Но прочность материала чаши (БрО8С12) более чем в 3,5 раза меньше прочности материала ротора (сталь ШХ15). Таким образом, в описанных условиях и при одинаковой площади поперечного сечения прочность поднутренной неровности чаши при действии аэродинамической силы $P_c \leq 6,21 \text{ нН}$ во много раз ниже прочности ПН ротора. Именно поэтому исключение ПН на рабочей поверхности чаш привело к снижению аэродинамической силы, действующей на каждую неровность, до $P_c \leq 2,7 \text{ нН}$ и одновременно с улучшением ламинарности перемещения газа в зазоре привело к значительному снижению загрязнения зазора

подвеса и всего гироскопа в период эксплуатации изделия, что подтверждено анализом загрязнений приборов.

Кумулятивность за счет ламинарности перемещения струи в трубках, обработанных вибросверлением и дорнованием в режиме отсутствия (см. регламент), в результате действия изложенных выше факторов также повышается. Это приводит к повышению эффективности действия струи устройств кумулятивного действия.

За счет перевода на новую технологию изготовления одного типоразмера чаши в условиях одного предприятия получен экономический эффект более 2 тыс. руб., при этом брак деталей (необходимость перерастачивания и доработки) снижен в 2 раза. Годовой экономический эффект перевода на новую технологию двух разновидностей трубок устройств кумулятивного действия составляет более 25 тыс. руб. (уровень цен 1990 г.).

2.4.10. Точность фасонного контура, герметичность и прочность деталей

Для размещения аппаратуры и приборов, работающих в жидких средах, применяются литые корпуса с фасонным контуром, изготавливаемые из силумина [АК9, АК7 (АЛ4, АЛ9)]. К корпусам предъявляются три основных требования:

- 1) точность контура фасонной поверхности;
- 2) герметичность;
- 3) прочность.

С целью получения необходимой геометрической формы корпуса обрабатывались обтачиванием по копиру с последующим шлифованием шкуркой. При этом обеспечивалась поверхность с $Ra = 0,32 \dots 1,25$ мкм.

Возникающая при снятии литейной корки течь (в результате пористости и раковичности литья) устранялась заваркой с последующей зачисткой и термообработкой. Заварка приводит к нарушению геометрической формы деталей, так как в местах сварки образуются утяжины, к снижению прочности корпусов из-за разнородности литого металла и металла в местах заварки, к значительным дополнительным затратам на заварку, доработку и термообработку деталей. До 27 % полуобработанных заготовок уходит в брак из-за течи и поломок при испытаниях.

С помощью обработки ППД оказалось возможным одновременно решить задачи сохранения точности фасонной поверхности, повышения герметичности и прочности деталей. За критерий оценки перекрытия литейных дефектов металла при обработке ППД принято уменьшение размеров (диаметра или длины) дефектов. Для сравнения влияния различных способов обработки на герметичность деталей автором введен коэффициент K_d перекрытия дефектов по диаметру:

$$K_d = \frac{d_o - d_o^1}{d_o},$$

где d_o — диаметр отверстия до обкатывания, мм; d_o^1 — диаметр отверстия после обкатывания, мм.

На рис. 2.102, а показана зависимость коэффициента K_d от диаметра радиальных отверстий при обкатывании образцов из литого алюминиевого сплава АК 9 (АЛ4, твердость 68 НВ) профильными роликами ($d_p = 45$ мм, $r_p = 4$ мм) и шаром ($d_{ш} = 15$ мм). При уменьшении размера дефектов значение коэффициента K_d возрастает, причем наибольшая крутизна кривых наблюдается при $d_o < 0,45$ мм. В принятых условиях происходит перекрытие отверстий с $d_o \leq 0,317$ мм при обкатывании роликом (кривая 5) и $d_o \leq 0,225$ мм — при обкатывании шаром (кривая 4). С изменением подачи от 0,07 до 0,21 мм/мин (кривые 1, 2, 3) зависимости K_d от d_o имеют идентичную форму, однако они расположены по мере увеличения подачи на более низком уровне значений K_d .

Анализ фотографий шлифов образцов с закатанными отверстиями показал, что при описанных условиях обкатывания отверстия диаметром 0,2...0,3 мм закатываются, причем толщина перемычки, перекрывающей отверстие, достигает 0,3...0,5 мм. Следует отметить, что перекрытие отверстий происходит не за счет развальцовки самого подповерхностного слоя, а за счет выпучивания металла в результате создаваемых напряжений в более глубоких слоях на расстоянии от поверхности до 0,4...0,6 мм (рис. 2.102, б).

Для испытания и проверки на герметичность было отобрано шесть корпусов с характерной течью. Отобранные корпуса после тщательного обследования и обмера дефектов в местах течи были обкатаны по копиру на установке (рис. 2.103) роликом с $d_p = 45$ мм,

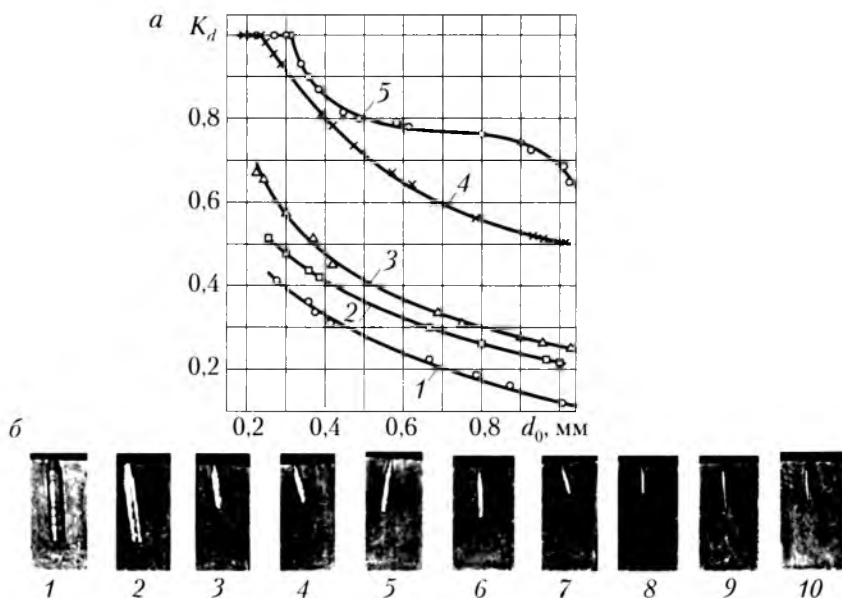


Рис. 2.102. Перекрытие дефектов литого сплава М4 при ШЩ:

a — зависимость коэффициента перекрытия от размера дефекта при обкатывании: 1 — роликом при $S = 0,21$ мм/об; $P = 100$ Н; 2 — роликом при $S = 0,14$ мм/об; $P = 100$ Н; 3 — роликом при $S = 0,07$ мм/об; $P = 100$ Н; 4 — шаром при $S = 0,21$ мм/об; 5 — роликом при $S = 0,07$ мм/об; $P = 230$ Н; b — процесс перекрытия отверстий разного диаметра при обкатывании профильными синусоидальными роликами заготовки диаметром 90,5 мм: 1 — $d_0 = 0,974$ мм; $P = 230$ Н; 2 — $d_0 = 0,877$ мм; $P = 230$ Н; 3 — $d_0 = 0,611$ мм; $P = 230$ Н; 4 — $d_0 = 0,582$ мм; $P = 230$ Н; 5 — $d_0 = 0,456$ мм; $P = 230$ Н; 6 — $d_0 = 0,453$ мм; $P = 330$ Н; 7 — $d_0 = 0,452$ мм; $P = 330$ Н; 8 — $d_0 = 0,345$ мм; $P = 330$ Н; 9 — $d_0 = 0,274$ мм; $P = 330$ Н; 10 — $d_0 = 0,257$ мм; $P = 330$ Н. Увеличение $\times 3$

$r_p = 4$ мм и параметрами режима по регламенту. При обработке корпус 3 цилиндрической поверхностью большой горловины устанавливается на палец планшайбы 2 передней бабки и через съемную планшайбу 8, размещаемую своим пальцем в отверстии малой горловины, подпирается вращающимся центром задней бабки. Поперечная каретка суппорта отключается от винта подачи. При помощи специального натяжного устройства, состоящего из кронштейнов, шкивов, троса и груза 6, соединенный с суппортом станка ролик 7 постоянно контактирует с установленным на раме 4 копиром 5. При продольном перемещении с подачей S суппорт, а вме-

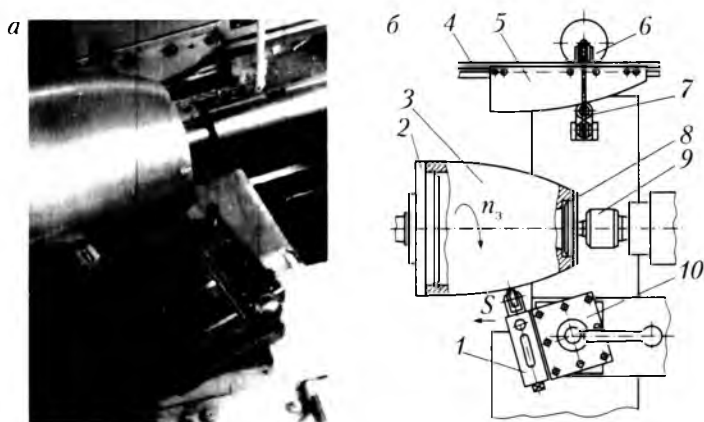


Рис. 2.103. Вибронакатывание корпусов аппаратуры профильным роликом на установке, созданной на базе токарно-винторезного станка и оборудованной рамой с копирным устройством (а), и схема обработки ППД по копиру (б)

сте с ним и приспособление 1 с профильным роликом описывают кривую в соответствии с рабочим контуром копира 5.

После обработки ППД корпуса были вновь обследованы в местах течи и прошли пятикратные испытания, согласно техническим условиям, пневмо- (0,5 МПа) и гидродавлением (3,5 МПа) с интервалом между испытаниями не менее 24 ч. Далее детали были подвергнуты анодному оксидированию и вновь испытаны пневмо- и гидродавлением. Результаты испытания представлены в табл. 2.41, из которой следует, что из общего количества мест течи (60) после обкатывания профильным роликом (один или два раза) осталось 11. Пятикратные испытания не привели к изменению количества мест течи. Заметное уменьшение течи обеспечивается анодным оксидированием, в результате которого осталось всего 5 мест течи.

Эффект уменьшения течи на 81,7 % при обработке ППД можно объяснить способностью металла заполнять пустоты (впадины микрорельефа и дефекты металла) в условиях объемно-напряженного состояния и при создании необходимых давлений за счет перераспределения микрообъемов металла. Уменьшение мест течи с 11 до 5 после оксидирования объясняется тем, что слой металла при

анодном оксидировании увеличивается в объеме по сравнению с неоксидированным. Размер детали при этом также увеличивается на 1/2 толщины слоя оксидированного металла.

Таблица 2.41

Результаты испытания корпусов аппаратуры на герметичность

Номер корпуса	Количество мест течи после						
	отливки	обтачивания	обкатывания		5-кратного испытания	анодного оксидирования	нагружения грузом 2 кН
			1 проход	2 прохода			
239	0	18	2	2	2	0	0
328	0	2	1	1	1	0	0
335	0	1	0	0	0	0	0
343	0	21	4	3	3	1	1
350	0	2	1	1	1	0	0
352	0	16	7	4	4	4	4
Всего	0	60	15	11	11	5	5

Кроме повышения герметичности и устранения отклонений формы корпусов по контуру, обработка ППД способствует повышению прочности обработанных резанием литых деталей. Это подтверждается описанным выше испытанием на прочность и всей практикой применения отделочно-упрочняющей обработки ППД при изготовлении корпусов. Использование обработки ППД в течение одного года обеспечило предприятию экономический эффект в сумме 7950 руб. и снизило брак деталей в 2,45 раза (уровень цен 1988 г.).

2.4.11. Гидро- и пневмоплотность подвижных соединений

Важным фактором успешного функционирования подвижных соединений различных редукторов, пневмо- и гидроприводов и других изделий является длительное сохранение их гидроплотности. Коробки перемены передач (КПП) автомобилей имеют ограниченный ресурс работы из-за нарушения гидроплотности и течи масла в подвижных соединениях штуцера с хвостовиком шестерни гибкого вала привода спидометра и шейки муфты вторичного вала с резиновой манжетой.

Испытания осуществлены на деталях, которые по шейке с винтовой канавкой (шестерни привода спидометра, $D_3 = 11$ мм, сталь А12, цианирование и закалка до твердости 56...61 HRC) и гладкой

шейке (муфта вторичного вала, $D_3 = 51$ мм, сталь 40X с закалкой до твердости 55...57 HRC) были обработаны алмазным выглаживанием в режимах по регламенту с обеспечением поверхности с $Ra = 0,2...0,4$ мкм.

За критерий потери работоспособности подвижных соединений КПП автомобиля был принят массовый износ шейки с маслогонной канавкой шестерни привода спидометра и резинового сальника муфты вторичного вала.

Для испытания были взяты шестерни привода спидометра с тремя видами обработки шейки:

- 1) алмазное выглаживание после химико-термической обработки;
- 2) алмазное выглаживание без химико-термической обработки деталей;
- 3) абразивная обработка по типовому технологическому процессу.

Испытание шейки шестерни осуществлялось в менее благоприятных условиях по сравнению с условиями работы деталей в КПП. Это заключалось, во-первых, в периодическом смазывании пары трения индустриальным маслом И-12А вместо постоянного смазывания деталей в КПП нигролом; во-вторых, шейка шестерни истиралась не во втулке-штуцере, как в КПП, а в колодках, полученных путем разрезки штуцеров, и зажимающих с определенной силой шейку шестерни (давление 250 кПа, частота вращения 90 мин^{-1}).

При 125 тыс. циклов истирания наименьший износ имели детали с алмазным выглаживанием после химико-термической обработки (рис. 2.104, а, кривая 1), далее следуют детали с алмазным выглаживанием без химико-термической обработки (кривая 2). Наибольший износ имели детали с третьим видом обработки (кривая 3). Для деталей с первым видом обработки зависимость установившегося изнашивания имеет вид прямой с наименьшим углом подъема (кривая 1). Наибольший угол подъема установившегося изнашивания наблюдается у кривой 3. Таким образом, обработанные алмазным выглаживанием после химико-термической обработки детали имеют при принятых условиях испытания в 3,6 раза большую износостойкость по сравнению с деталями, обработанными по существующему ранее технологическому процессу (шлифование шкуркой), что свидетельствует о более длительном сохранении малого зазора и гидроплотности соединений.

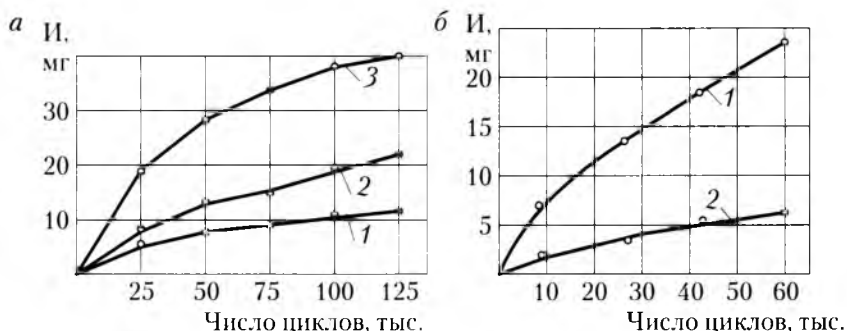


Рис. 2.104. Влияние на работоспособность уплотнительных устройств КПП состояния рабочих поверхностей деталей КПП автомобиля ГАЗ-51:

а — шестерни привода синдومتра; *б* — муфты вторичного вала

Обработка шеек муфт вторичного вала КПП ранее осуществлялась также шлифованием шкуркой. Для испытания уплотнительного устройства с резиновой манжетой КПП были изготовлены муфты вторичного вала двух групп: 1) с обработкой по существующему технологическому процессу; 2) с обработкой алмазным выравниванием с параметрами режима в соответствии с регламентом. Результаты испытаний приведены на рис. 2.104, б, из которого следует, что манжеты, работавшие с муфтами, обработанными алмазным выравниванием (кривая 2), при одинаковом количестве циклов истирания имели износ в 3,4 раза меньший по сравнению с износом манжет, работавших с муфтами, обработанными шлифованием (кривая 1) и имеющими на рабочей поверхности ПН.

Испытания деталей и соединений в условиях эксплуатации КПП подтвердили результаты стендовых испытаний, при этом ресурс работы КПП по гидроплотности повысился более чем в 2 раза. Подобные результаты получены для коробок скоростей станков и других редукторов.

В автоматизированных термокалибровочных печах типа КСМ-3М цилиндры пневмоприводов исполнительных механизмов выполнены из стали 12Х18Н10Т.

Отделочная обработка рабочей поверхности пневмоцилиндров диаметром 125 мм и длиной 270 мм растачиванием не обеспечивала заданной отделки поверхности с $Ra = 0,16...0,32$ мкм и отсутствия ПН. В условиях эксплуатации при температуре свыше 420 К детали

пары трения и особенно резиновые кольца быстро выходили из строя, что приводило к потере пневмоплотности привода и снижению эффективности его работы. Решить задачу обеспечения требуемой микрогеометрии рабочей поверхности цилиндров и пневмоплотности подвижного соединения привода оказалось возможным с помощью применения обработки ППД. Режим обработки ППД выбирается по регламенту. Перед ППД поверхность с $Ra = 1,25...2,5$ мкм обеспечивалась растачиванием. После обработки ППД с $P = 180...300$ Н при виброраскатывании шаром ($d_{ш} = 9,5$ мм) и с $P = 200...350$ Н при виброраскатывании роликом ($d_p = 40$ мм, $r_p = 3$ мм) и $P = 220...400$ Н при раскатывании шаром ($d_{ш} = 9,5$ мм) достигается заданная микрогеометрия поверхности и отсутствие ПН (разновидность 0). Следует отметить, что в результате ППД возрастает микротвердость с исходного значения 270 до 457 при раскатывании и до 470 при виброраскатывании (толщина подповерхностного упрочненного слоя соответственно 0,027 и 0,029 мм).

В результате более полного прилегания к поверхности цилиндра резинового кольца и повышения его износостойкости ресурс работы пневмоприводов с раскатанными и виброраскатанными цилиндрами возрастает соответственно в 2,4 и 3,2 раза.

Испытания на пневмоплотность приводов и ресурс их работы по пневмоплотности проведены непосредственно в термокалибровочных печах КСМ-3М. Они полностью подтвердили результаты экспериментальных исследований.

Использование прогрессивной технологии изготовления деталей подвижных соединений привело к уменьшению затрат на изготовление деталей и обслуживание машин и оборудования. Экономический эффект в условиях Черниговского ремонтно-механического завода «Октябрьский молот» и Алтайского приборостроительного завода «Ротор» составил более 470 тыс. руб. (уровень цен 1991 г.).

2.4.12. Коррозионная стойкость деталей, адгезия покрытий, прочность неразъемных соединений и декоративная отделка товаров народного потребления

Можно повысить сопротивление коррозии за счет увеличения радиусов округления впадин микронеровностей при образовании ПРМР и обеспечения разновидности 0 поверхностей деталей.

На рис. 2.105 показан стальной палец дифференциала, левая сторона которого была обработана алмазным выглаживанием с обеспечением $Ra = 0,18...0,32$ мкм, а правая — шлифованием с обеспечением $Ra = 0,22$ мкм. После года хранения в условиях цеха правая сторона пальца, обработанная шлифованием, интенсивно корродировала, при этом первые следы коррозии появились уже на 11-й день после обработки. На левой стороне, обработанной ППД с обеспечением ПРМР и разновидности 0 поверхности, первые признаки коррозии были замечены лишь после 10 месяцев хранения.

Адгезия и качество покрытия зависят от размеров, формы и расположения неровностей поверхности, уровня ее загрязненности. Для обеспечения наименьшей шероховатости покрытых деталей обычно применяются полировочно-доводочные операции перед покрытием. В процессе выполнения этих операций поверхность загрязняется элементами доводочных паст (абразив, жировые продукты и другие компоненты), наличие которых после доводки и тщательной промывки наблюдается в микропорах металла и впадинах неровностей поверхностей. Это, а также неоднородность микрогеометрии, наличие ПН являются главными причинами пониженной адгезии, плохого качества поверхности и слоя покрытия.

Сущность процесса химического никелирования заключается в образовании осадка никеля на поверхности детали химическим восстановлением ионов никеля ионами гипофосфата до металла. Адгезия химического никелевого покрытия с основным металлом выше, чем при электролитическом никелировании, и составляет

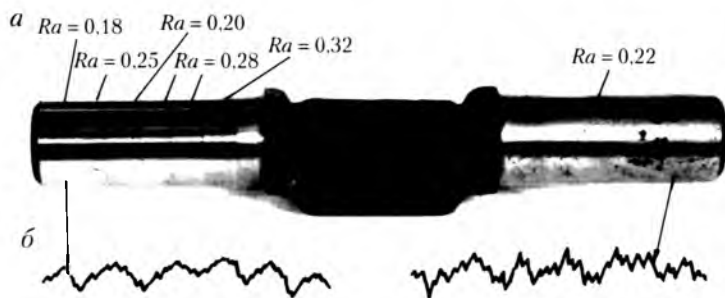


Рис. 2.105. Палец дифференциала из стали 18ХГТ (трактора Т-150 (ХТЗ) после испытания на коррозионную стойкость (а) и профилограммы боковых поверхностей пальца с различной обработкой (б)

415 МПа из кислых и 219 МПа из щелочных сред [7]. Более высокая адгезия покрытия наблюдается при химическом никелировании сталей и медных сплавов. Она может быть повышена термообработкой при температуре 473...493 К. Химическое никелирование характеризуется равномерностью слоя покрытия (отклонение толщины слоя не превышает 10 %), высокой коррозионной стойкостью, сравнительно низкой пористостью и высокой износостойкостью.

Все сказанное позволило правильно выбрать техпроцессы обработки заготовок под покрытие, химического никеливания, термообработки, обработки деталей после покрытия. Перед покрытием детали демпфера вместо доводки обрабатываются: цилиндры — дорнованием (см. рис. 2.72, *з*), поршни — алмазным выглаживанием (рис. 2.106, *а*) с параметрами режима в соответствии с регламентом.

Испытания поршней и цилиндров демпфера БСГ и гидравлического тормозного устройства (ГТУ) показали, что обработка ППД положительно сказалась на качестве деталей. Были полностью исключены случаи отслаивания покрытия, что имело место при обработке заготовок перед покрытием доводкой и приводило к браку деталей, составляющему 52 %; после покрытия исключено загрязнение поверхности и подповерхностного слоя деталей продуктами обработки, устранены поры покрытия.

Испытаниями установлено, что прочность соединения слоя покрытия с основным металлом возросла в среднем на 21...31 % [6]. Именно за счет повышения адгезии обеспечена возможность замены доводки деталей после покрытия на алмазное выглаживание.

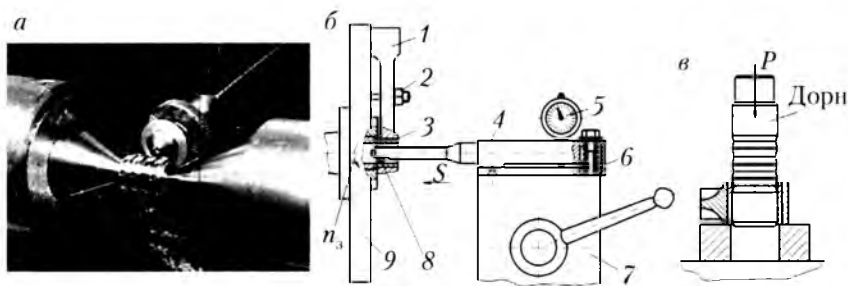


Рис. 2.106. Обработка заготовок ППД:

а, б — поршней демпфера и втулок алмазным выглаживанием;
в — втулок дорнованием

с помощью которого проверяется также прочность соединения покрытия с основным металлом детали. Отделочная обработка алмазным выглаживанием после покрытия позволила создать оптимальные в отношении износостойкости, легкости сдвига и плавности перемещения поверхности деталей БСГ и ГТУ. В целом обработка ППД обеспечила снижение брака деталей с 52 % до 2 % за счет повышения адгезии, качества покрытия и его эксплуатационных свойств.

Крышки акустических устройств работают в морской воде. Они изготавливаются из латуни Л63, покрываются химическим никелем и красятся краской. Практикой эксплуатации гидроакустических антенн, датчиков и других устройств выявлено, что при механических повреждениях слоя краски на отдельных деталях в результате пористости покрытия появляются следы коррозии (точечное позеленение).

Для испытания были изготовлены пластическим формованием заготовки крышек, которые имели плавные переходы поверхностей цилиндра и торца; торца, прямоугольного паза и его фаски. Цилиндрическая поверхность и торец после точения обрабатывались алмазным выглаживанием до и после покрытия в режиме по регламенту. Осмотр поверхностей деталей под микроскопом показал, что пористость покрытия у выглаженных алмазным наконечником ($r_c = 1,5$ мм) деталей отсутствует. 10 деталей с алмазным выглаживанием (заготовка получена пластическим формованием) и 10 — без него (заготовка получена из прутка точением, прямоугольный паз обработан фрезерованием с последующим пропиливанием углов и опиливанием фаски надфилями) были помещены на 35 суток в емкость с морской водой. Через 8 суток на отдельных деталях, не обработанных алмазным выглаживанием, просматривались точечные следы коррозии (позеленение). К концу срока испытания позеленение имели все детали, не обработанные ППД, причем наибольшая коррозия наблюдалась на переходах поверхностей деталей. На поверхностях деталей, обработанных ППД, следы коррозии не наблюдались.

Представляет интерес обработка ППД подшипников скольжения во впрессованном состоянии. Здесь, помимо улучшения качества поверхностей подшипников, повышается прочность соединения втулка — корпус.

На рис. 2.106, б показана схема алмазного выглаживания втулки верхней головки шатуна двигателя автомобиля ГАЗ-53. Шатун 1 центрируется по отверстию впрессованной втулки 3 с отверстием планшайбы 9 (по съемному пальцу) и закрепляется гайкой 2. Приспособление 4 устанавливается в резцедержателе 7 токарно-винторезного станка.

Сила поджима обеспечивается тарированной пружиной 6. Учитывая, что поверхность втулки 3 прерывистая, настройка на обработку выглаживанием производится по индикатору 5. Алмазный наконечник 8 после касания подается суппортом на обрабатываемую поверхность на 10...12 мкм, что обеспечивает плавную работу и заклинивание наконечника при прохождении над масляными каналами. Исходная поверхность втулок выполняется растачиванием ($Ra = 1,25...2,5$), после выглаживания обеспечивается поверхность с $Ra = 0,08...0,32$ мкм.

Установлены рациональные для принятых условий параметры режима обработки подшипников скольжения из бронзы марок БрО8С1; БрОЦС4-4-2,5; БрОЦС5-5-5 при алмазном выглаживании наконечника: $r_c = 2,5$ мм; $S = 0,03$ мм/об; $n_3 = 400$ мин⁻¹; $P = 15...40$ Н (при обработке БрО8С12 и БрОЦС4-4-2,5) и $P = 25...50$ Н (при обработке БрОЦС5-5-5).

На рис. 2.106, в показана схема обработки впрессованной втулки верхней головки шатуна двигателя А-01 дорном (сталь 9ХС, закалка до твердости 57...63 HRC). Для обработки дорнованием втулок шатунов двигателей А-01, Д-54, СМД-14, СМД-7, Д-50 и Д-48 разработано приспособление с набором дорнов и подставок. Процесс дорнования втулок с целью отделки-упрочнения и повышения прочности соединений используется на алтайских моторном и агрегатном заводах и других предприятиях.

На Харьковском моторостроительном заводе «Серп и молот» используется обработка втулок СМД-9-0304 верхней головки шатуна двигателя СМД-14 раскатыванием во впрессованном состоянии многороликовым приспособлением на вертикально-сверлильном станке.

Стендовые испытания деталей, изготавливаемых Алтайским моторным заводом, показали, что прочность прессовых соединений после обработки втулок дорнованием повысилась в 1,5–4 раза, сопротивление осевому сдвигу — в 1,2–3,4 раза и сопротивление мо-

менту нрворота одной детали относительно другой — в 1,4–2,7 раза при обеспечении высокой точности отверстия.

Подобные результаты повышения прочности прессового соединения втулка — верхняя головка шатуна двигателей, выпускаемых Харьковским моторостроительным заводом «Серп и молот», получены при раскатывании роликовыми раскатниками и алмазным вибровыглаживанием отверстия впрессованной втулки. При этом прочность соединения повышается примерно на 70 %. В 1,5 раза увеличивается прочность прессового соединения втулка — зубчатое колесо при виброраскатывании втулок, впрессованных в центральное отверстие зубчатых колес металлорежущих станков [9].

Втулки (материал Л63) собачек прецизионных шаговых двигателей вставляются в отверстия (поверхность разновидности 2) собачек с посадкой $4H7/h6$. После дорнования втулки дорном по схеме (см. рис. 2.106, в) обеспечивается посадка $4H7/s6$ и оптимальная шероховатость втулки в отношении износостойкости. Испытание соединения на сдвиг подтвердили, что соединение имеет прочность, предусмотренную ТУ.

Испытание на прочность соединения корпус датчика (титановый сплав ВТ6) — пробка (стекло), обеспечиваемого заливкой стекла в жидком состоянии, показало, что при создании вибро-сверлением поверхности отверстия разновидностей 4 и 5 прочность соединения возрастает на 27...44 %. Особенно важно, что повышенная прочность сохраняется при температурах работы датчиков от 223 до 493 К.

Подобные результаты повышения прочности неразъемных соединений получены при заливке втулок колонок штампов и корпусов накладных кондукторов из эпоксидных компаундов. При обеспечении разновидностей 4 и 5 поверхности отверстия верхней плиты блока штампа и наружной цилиндрической поверхности кондукторных втулок прочность соединения металл — эпоксидный компаунд возрастает на 18...22 %.

Следует отметить также, что лакокрасочные покрытия, наносимые на слой металлического покрытия с не загрязненной продуктами обработки поверхностью, имеют более прочное соединение с деталью. Это подтверждается испытаниями деталей часов и хронометров с нанесенными покрытиями и шкалами в различных средах (воздух с повышенной влажностью, пар, жидкость) с тем-



Рис. 2.107. Переносной микрофон (а), детали мебели (б) и электроутюг (в), внешние поверхности которых имеют декоративную отделку ППД

пературой от 223 до 323 К. При этом отслоение лакокрасочного покрытия, нанесенного на незагрязненные хромированные и никелированные поверхности разновидности 2, в период всех испытаний не наблюдалось.

Использование в производстве прогрессивной технологии, обеспечивающей повышение адгезии слоя покрытия, коррозионной стойкости деталей и прочности неразъемных соединений, обеспечило экономический эффект, превышающий 280 тыс. у.е.

Регуляризация микрогеометрии внешних поверхностей обеспечивает улучшение товарного вида изделий народного потребления. На рис. 2.107, а показан переносной микрофон с ручкой, на наружной поверхности которой нанесен ЧРМР. Металлические детали с различным микрорельефом наружных поверхностей (рис. 2.107, б) позволяют улучшить внешний вид, эстетичность и товарные свойства мебели. Утюг (рис. 2.107, в) с ЧРМР на поверхности крышки приобретает новые эстетические свойства.

2.5. Области, нормативная база и эффективность применения прогрессивной технологии в машино- и приборостроении



2.5.1. Отрасли эффективного применения технологического улучшения эксплуатационных характеристик деталей и соединений

В машиностроении и металлообработке ППД желательно использовать при отделке деталей всех соединений, где необходимо уменьшить потери на трение и повысить размерную стабильность,

снизить нагрев, увеличить ресурс безотказной работы пар трения, обеспечить легкость сдвига и плавность перемещения, полностью исключить натир, задиры и схватывание. При этом ресурс безотказной работы повышается в 1,4–3,0 раза и более.

В станкостроении при обработке вибронакатыванием и вибро-выглаживанием плоских и цилиндрических направляющих станков и прессов, подшипников скольжения, балансиров, шпинделей, валов, ползунов и осей исключается трудоемкая ручная операция шабрения, механической доводки и полирования, повышается ресурс безотказной работы в 1,4–1,6 раза; исключаются все патологические виды изнашивания.

В инструментальной промышленности выглаживание и вибро-выглаживание измерительных калибров, колонок штампов, скалок подвесных кондукторов, пальцев, штоков, дорнов повышает ресурс работы оснастки в 1,4–3,2 раза; вибронакатывание притиров, вытяжных матриц и пуансонов, фильер, валков и других инструментов исключает налипание обрабатываемого материала на рабочие поверхности, значительно повышает ресурс их работы.

В автомобильной и тракторной промышленности обработка ППД рабочих поверхностей деталей шатунно-кривошипного механизма (гильзы цилиндров, поршни, пальцы, втулки и вкладыши, коленвалы), коробок перемены передач и дифференциалов (валы, ползуны, муфты вторичных валов, шестерни привода спидометра, пальцы), других сборочных единиц и деталей повышает ресурс безотказной работы в 1,2–3,1 раза.

В авиационной промышленности регуляризация микрогеометрии рабочих поверхностей прецизионных пар топливной аппаратуры (корпуса, плунжеры, золотники), амортизаторов (штоки, втулки), внешних деталей крыльев и фюзеляжа обеспечивает повышение качества и надежности, гарантированное уменьшение потерь на трение.

В судовом машиностроении и судостроении обработка ППД гильз, втулок судовых дизельных двигателей, шейко-коленчатых валов, щитовых элементов и обшивки приводит к повышению надежности, ресурса работы на 20...40 %, исключению явления масляного «голодания», задилов и схватывания, повышению эстетичности щитов и обшивки.

На железнодорожном транспорте обеспечение регулярных микро рельефов на рабочих поверхностях плунжеров дизельных двигателей, подшипников скольжения, цапф скатов, валов приводит к повышению ресурса их безотказной работы в 1,5–2,5 раза.

В приборостроении обработка ППД рабочих поверхностей деталей микроэлектромашин автоматики, автоматов глубины, гироскопических и других приборов обеспечивает размерную стабильность деталей и зазоров, ламинарность перемещения газов в малых зазорах, прочность посадок, других свойств, что повышает надежность и ресурс безотказной работы изделий.

В текстильном машиностроении вибронакатывание полностью исключает необходимость 25-часовой прикатки колец и бегунков, уменьшает износ колец в 4–6 раз, снижает обрывность нити на 20...30 %, повышает ресурс безотказной работы прядильных и ткацких станков.

В металлургической промышленности прокатка листов и лент в вибронакатных вальках обеспечивает создание проката с заданными эксплуатационными свойствами: механическими, декоративными, электрическими, магнитными и другими; широкое применение листов и лент с РМР приводит к улучшению декоративных и эстетических свойств изделий, исключает трудоемкое и загрязняющее среду абразивное полирование.

В электротехнической промышленности обработка ППД деталей размыкателей, ламелей, шин, коллекторной пары, электронагревательных устройств (отражателей и рефлекторов) позволяет уменьшать контактное электросопротивление, исключать необходимость или уменьшать толщину покрытия (до 2 раз); совмещать операции формообразования деталей выдавливанием на оправках с оптимальным в отношении отражения света и тепла контуром и отделки отражающей поверхности.

В ремонтном производстве применение накатывания и выглаживания, вибронакатывания и вибровыглаживания позволяет восстанавливать размеры поверхностей некоторых изношенных деталей за счет создания приканавочных наплывов материала, улучшать эксплуатационные свойства поверхностей наплавленных, осажденных, напыленных и других слоев материала, уменьшать их пористость, увеличивать адгезию с материалом подложки, обеспечивать

экономии материалов за счет «второй» жизни деталей и уменьшения потребности в запчастях.

Уплотнительные устройства техники с резиновыми, эластомерными и другими упругими уплотнительными деталями (манжеты, кольца, прокладки) во всех отраслях промышленности при применении обработки ППД рабочих поверхностей металлических контртел (втулки, штоки, валы, цапфы) приобретают повышенные гидро- и пневмоплотность и ресурс безотказной работы.

Во всех отраслях промышленности, включая производство товаров народного потребления, вибрационное ППД обеспечивает декоративную и отделочную обработку деталей из металлов, стекла, пластмасс с неограниченным разнообразием рисунков, заменяя при этом дорогостоящее, экологически «грязное», часто немеханизированное полирование, лакокрасочные и гальванические покрытия.

2.5.2. Создание нормативной базы применения новых технологических процессов

Основой создания нормативно-директивных документов по применению РМР и способов их образования явилось введение в 1982 г. в действие ГОСТ 24773–81 и создание проекта международного стандарта «Поверхности с регулярным микрорельефом (РМР)». Учтены вопросы регуляризации микрогеометрии технических поверхностей в ряде уже существующих стандартов, например в ГОСТ 7599–82 «Станки металлообрабатывающие» (п. 2.49) и ГОСТ 3608–84 «Кольца крутильных и прядильных машин». Разработаны и введены в действие отраслевые стандарты, многие руководящие технические материалы.

Рекомендации по обеспечению качества деталей и изделий в процессе производства обычно излагаются в виде таких нормативных документов, как технологические регламенты, впервые введенные Научно-производственным объединением по комплексному технологическому проектированию станкостроительных предприятий (Оргстанкимпром). Примеры регламентов по изготовлению прецизионных деталей представлены в табл. 2.42.

Таблица 2.42

Технологические регламенты изготовления прецизионных деталей

Наименование регламента и операции	Наименование и материал детали, технические требования к ней и содержание регламента	Примечание
Механическая обработка корпусов асинхронных тахогенераторов	Корпус КФ8.020.204 А/ДТ-507 (ВТ1-1). Обработка по наружной поверхности диаметром 51,8$\pm$0,047 (уровень относительной геометрической точности С; $Ra_{\text{нр}} = 0,4$ мкм, разновидности 0). Перед предшествующей ППД обработкой («припуск 1 мм») заготовки подвергать отжигу (патрв 1073 К, выдержка 1 ч, охлаждение с печью). Предшествующую ППД обработку установленной по отверстию на разжимной палке приспособления заготовки осуществлять на станке мод. 1Е61МТ резцом с обеспечением размера по чертежу («припуск» под ППД — 6 мкм) и поверхности $Ra_{\text{нр}} = 1,6$ мкм. Обкатывание поверхности осуществлять шаром диаметром $d_{\text{ш}} = 5,6$ мм при режиме: $P = 100$ Н; $S = 0,02$ мм/об; $n_s = 800$ мин$^{-1}$; СОЖ МР2У. Настройку на прецизионную обработку ППД осуществлять по инструкции С50.045.025. Контроль размера и шероховатости поверхности (Ra и отсутствие поднутренних неровностей)	Обработку ППД осуществлять сразу после предшествующего обтачивания без снятия заготовки со станка
	Обработка корпуса по внутренней цилиндрической поверхности диаметром 45Н6 (уровень С, разновидности 0). Заготовку по наружной цилиндрической поверхности установить в трехкулачковый патрон станка 1Е61МТ со специальными расточными по месту кулачками, расточить резцом с обеспечением размера по чертежу («припуск» под ППД 5 мкм) и поверхности с $Ra_{\text{нр}} = 1,6$ мкм. Раскатывание осуществить шаром диаметром $d_{\text{ш}} = 5,6$ мм при режиме: $P = 120$ Н; $S = 0,02$ мм/об; $n_s = 800$ мин$^{-1}$; СОЖ МР2У. Настройку на обработку осуществлять по руководящим техническим материалам С50.000.099 и инструкции С50.045.025. Обработку проводить в условиях термоконстантного цеха при температуре 293 К	Раскатывание и раскатывание отверстия осуществлять за одну установку без снятия заготовки со станка

Продолжение табл. 2.42

Наименование регламента и операции	Наименование и материал детали, технические требования к ней и содержание регламента	Примечание
Механическая обработка сердечников АДТ-507	Сердечник КФ7.773.018 (ВТ5). Обработка по наружной цилиндрической поверхности диаметром 9,5 $\pm$ 0,005 (уровень относительной геометрической точности С, $Ra_{\text{нп}} = 0,2$ мкм, разовидность 0). После отжига и обработки отверстия заготовку установить по отверстию на оправку, один конец которой зажать в патроне станка мод. ДЛЗ-400 или 1Е61МТ, другой — подпереть центром задней бабки. Обточить посадочные пояски ($Ra_{\text{нп}} = 0,8$ мкм) и обработать обкатыванием шаром диаметром $d_{\text{ш}} = 3$ мм при режиме: $P = 50$ Н; $S = 0,02$ мм/об; $n_s = 2000$ мин $^{-1}$; СОЖ МР2У. Настройка на обработку ППД — по инструкции С50.045.050	Обработку заготовки резанием и ППД осуществлять за одну установку в условиях среды с температурой $293 \pm 0,5$ К
Обработка деталей магнитопроводов (пакетов) микроэлектронных автоматов	Пакет статора КФ6.667.887 двигателя АДТ-507 (сплав 79НМ). Обработка наружной поверхности диаметром $45^{+0,020}_{-0,009}$ (уровень относительной точности С, $Ra_{\text{нп}} = 0,2$ мкм; разовидность 0). Обработку производить на токарно-винторезных станках мод. «Шaublin», 1Е61МТ с базированием заготовки по отверстию 28Н7 на бронзовой оправке, проточенной в положении на станке (конусность 0,005). Обточить поверхность резцом из твердого сплава Т5К10 с геометрией режущей части: $\gamma_n = 22^\circ$; $\alpha_n = 14^\circ$; $\phi_n = 40^\circ$; $\phi_{n1} = 60^\circ$. Обеспечить поверхность с $Ra_{\text{нп}} = 1,6$ мкм; диаметр — по чертежу с «принусом» под ППД 4 мкм. Обработать обкатыванием шаром диаметром $d_{\text{ш}} = 4$ мм. Режим обработки: резанием — $n_s = 430$ мин $^{-1}$; $S = 0,025$ мм/об; число проходов $n_{\text{пр}} = 2...3$; ППД — $P = 15...25$ Н; $n_s = 600$ мин $^{-1}$; $S = 0,025$ мм/об; $n_{\text{пр}} = 1$. Обработку ППД осуществлять с прецизионной настройкой. Контроль размера и формы поверхности, отсутствия замыкания пластин пакетов между собой. Применение СОЖ недопустимо	Обтачивание и обработку ППД осуществлять за одну установку заготовки

	Пакет ротора КФ6.668.001 малогабаритного следящего трансформатора (сила 50Н). Обработка прерывистой наружной цилиндрической поверхности сегментных пакетов диаметром 80/6 (суровень С, $Ra_{\text{ср}} = 0,4$ мкм; радиусность 0). Сегментные пакеты по двум отверстиям устанавливаются на многослойное приспособление и обрабатываются на станке мод. «Лайнер» или ТВ-320. Обтачивание осуществляется резцом из стали Р18 ($\gamma_n = 29^\circ \pm 30^\circ$; $\alpha_n = 10^\circ \pm 30^\circ$; $\varphi_n = 46^\circ$; $\varphi_{n1} = 25^\circ$) при режиме: $S = 0,02$ мм/об; $n_s = 120...150$ мин⁻¹; $n_{\text{пр}} = 2$; глубина резания для чистового прохода $t_n = 0,05...0,07$ мм; шероховатость обработанной поверхности с $Ra_{\text{ср}} = 1,6$ мкм. Обтачивание производится обтачивателем 1100-3229 ($d_{\text{ш}} = 7,1$ мм) в режиме: $P = 50...80$ Н; $S = 0,02...0,03$ мм/об; $n_s = 80...100$ мин⁻¹. Обеспечить тщательную прецизионную настройку на обработку ППД с подачей резцедержателя с инструментом «на заготовку» не более чем на 6...8 мкм. Приспособление СОЖ недопустимо. Контроль размера — на приспособлении с контролером ОТК. Проверка пакетов на отсутствие ПН и замыкания пластин между собой. Изготовление пакетов производить в изолированном от внешней среды цехе с кондиционированием воздуха при постоянной температуре ($293 \pm 0,25$ К) и влажности	Обработку наружной поверхности пакетов релаксом и ППД осуществлять за одну установку
Обработка деталей поджатого контакта микродеформации	Коллектор Ит7.301.000 (пластины М1) с родисвым покрытием толщиной 4...5 мкм. Предварительную обработку наружной поверхности диаметром 18/6 обеспечить обтачиванием с обеспечением $Ra_{\text{ср}} = 0,8$ мкм и последующим обтачиванием ($Ra_{\text{ср}} = 0,2$ мкм) шаром ($d_{\text{ш}} = 3$ мм; $P = 15...20$ Н; $S = 0,02$ мм/об; $n_s = 800$ мин⁻¹). После покрытия родисм обработку поверхности детали осуществить в сборочной единице Ит 6.616.001С6 алмазным выглаживанием локонетником с $r_c = 0,5$ мм и $P = 60$ Н (радиусность 0). Контроль размера, микрогеометрии поверхности ($Ra_{\text{ср}} = 0,2$ мкм, $N_n = 0$) и отсутствия завалов кромок. Щетки коллектора (бронза БрБ2) обрабатывать на станке мод. ТВ-320 на многослойном приспособлении. После растачивания резцом из стали Р9 ($S = 0,015$ мм/об; $n_s = 600$ мин⁻¹; $t_n = 0,05$ мм) поверхность обработать раскатыванием шаром с $d_{\text{ш}} = 8$ мм ($P = 0,75$ Н; $n_s = 200$ мин⁻¹; $S = 0,05$ мм/об). Контроль размера 18/6 осуществлять в приспособлении на станке. Проверить шероховатость ($Ra_{\text{ср}} = 0,4$ мкм; $h_n = 0,16...0,24$ мкм; $N_n \leq 80$ ПН/мм²). Обработку производить в условиях термостатного цеха с пониженной загрязненностью и влажностью	Недопустимо значить потемнения на поверхности абразивной шкуркой. Обработку ППД щеток с обеспечением поверхности разности 4 выполнять с $P = 0,3$; $P_r = 37,5$ Н. Допускается обеспечивать $Ra_{\text{ср}} = 0,4$ мкм и радиусность 4 поверхности накачиванием и вибропокачиванием в режиме образования ЧРМР и РПН ($h_n = 0,16...0,24$ мкм)

Продолжение табл. 2.42

Наименование регламента и операции	Наименование и материал детали, технические требования к ней и содержание регламента	Примечание
Обработка шестерен и муфт редукторов	Муфта вторичного вала КПП грузового автомобиля завода ГАЗ (сталь 40Х с поверхностной закалкой ТВЧ до твердости 56 HRC). Обработка наружной цилиндрической поверхности диаметром 51h7 алмазным выглаживанием ($Ra_{\text{нр}} = 0,4$ мкм, разнородность 0). Заготовку после термообработки и зачистки обрабатывать сферическим наконечником с естественным алмазом ($r_c = 3,15$ мм). Режим алмазного выглаживания: $P = 300$ Н; $S = 0,1$ мм/об; $n_s = 1200$ мин ⁻¹ ; $n_{\text{нр}} = 1$; СОЖ — масло И-20А. Станок типа мод. 1А616. Контроль размера и микрогеометрии поверхности (Ra ; отсутствие ПН). Шестерня привода синдомстра КПП (сталь А12, цинирование с последующей закалкой в масло до твердости 56...61 HRC). Обработка шейки с винтовой маслостонной канавкой диаметром 11h7 алмазным выглаживанием ($Ra = 0,6$ мкм). Шейку обработать на станке 1А616 выглаживанием искусственным алмазным наконечником (ИПР-95) с радиусом сферы $r_c = 2,5$ мм в режиме: $P = 200$ Н; $S = 0,07$ мм/об; $n_s = 610$ мин ⁻¹ ; $n_{\text{нр}} = 1$. Контролировать микрогеометрию, отсутствие ПН	Регламент распространяется на отделочную обработку поверхностей деталей уплотнительных устройств, работающих в паре с резиновыми манжетами и фетровыми (войлочными) кольцами, а также может использоваться при обработке плунжеров (сталь ХВГ) прецизионных форсунок автомобильных, судовых и других двигателей внутреннего сгорания
Обработка гильз и цилиндров шнекомприводов	Гильза шнекомпривода термокалориферной печи КСМ-3М (сталь 12Х18Н10Т). Обработка внутренней цилиндрической поверхности диаметром 125H7 ($Ra = 0,15$ мкм, разнородность 0). Растачивание цилиндров осуществлять на станке 1К62 с шероховатостью $Ra = 1,4$ мкм и «принусом» под обработку ППД 8 мкм. Виброраскачивание производить виброголовкой электромагнитного действия на станке 1К62 или на виброустановках ВУ-2, ВУ-3 и ВУ-4, оснащенных виброголовками электромагнитного действия. Режим виброраскачивания шаром: $d_{\text{ш}} = 10$ мм; $P = 350$ Н; $n_s = 315$ мин ⁻¹ ; $n_{\text{двх}} = 6000$ мин ⁻¹ ; $2A = 1,1$ мм. Базирование заготовки производить в расточенных кулачках трехкулачкового патрона и в неподвижном люнете станка. Контролировать микрогеометрию поверхности (Ra , отсутствие ПН)	Регламент распространяется на обработку гильз и цилиндров шнекомприводов, работающих в условиях повышенных температур (423 К и выше)

Обработка деталей демифера автома- тов глубины	Цилиндр 241.07.1068 (латунь ЛС59-1). Обработка поверхности диаметром 12Н7 ($Ra_{cp} = 0,2$ мкм, радиальность 0). После растачивания цилиндра на станке мод. «Лайнен» осуществлять дорнирование на станке мод. 2A125 сульфидированными дорнами при параметрах режима и инструмента по инструкции С20.045.021. После химического никелирования (слой покрытия — 10 мкм) применить алмазное выглаживание с помощью приспособления 1310-0060 в соответствии с инструкцией С 50.045.018. Параметры режима алмазного выглаживания наконечником с $r_n = 2$ мм; $P = 10$ Н; $S = 0,02...0,03$ мм/об; $n_s = 500$ мин⁻¹; СОЖ — масло И-12А. Контроль размера — пневмокалпиром в трех сечениях и двух радиальных направлениях. Проверять шероховатость (Ra, отсутствие ПН) и целостность слоя покрытия. После обработки и контроля детали промыть в бензине «Калоша».	Алмазное выглаживание осуществлять после установки заготовки с бисением, не превышающим 3 мкм
	Поршень 241.07.1069 (латунь Л63). Обработка наружной поверхности с радиальными канавками. После obtачивания резцом ($Ra_{cp} = 1,4$ мкм) выгладить сферическим алмазным наконечником с $r_n = 3,25$ мкм, установленным в приспособлении 1100-3229, на станке мод. ТВ-320 в режиме: $P = 15...20$ Н; $S = 0,05...0,12$ мм/об; $n_s = 1120$ мин⁻¹. Осуществить алмазное выглаживание по слою покрытия ($Ra_c = 0,2...0,3$ мкм) по инструкции С50.045.018. Сила обработки $P = 7...10$ Н. Контроль размера, шероховатости поверхности (Ra, отсутствие ПН), целостности покрытия и отсутствия отслоений. При алмазном выглаживании по слою покрытия применять СОЖ — масло индустриальное И-12А с последующей промывкой деталей в бензине «Калоша» и продувкой воздухом. Отделочную обработку деталей демиферов производить в условиях термостатного цеха, с пониженной загрязненностью и влажностью	При установке заготовок в центрах станка проверять радиальное бисение, которое не должно превышать 4 мкм. Регламент применением при изготовлении прецизионной пары цилиндр — поршень гидравлического привода тормозных систем

Наименование регламента и операции	Наименование и материал детали, технические требования к ней и содержание регламента	Примечание
Обработка корпусных деталей датчиков	Корпус термометра Ит8.034.004 (ВТ6). Обработка концентричных отверстий диаметрами 4Н7 и 8Н9 ($Ra_{\text{ср}} = 0,4 \text{ мкм}$; разноточность соответственно 0 и 4). Вибросверление отверстия $d = 4 \text{ мм}$ на всю глубину 72 мм осецировать вибросверлом, армированным пластиком твердого сплава ВК8, на виброустановках ВУ-1 (ВУ-2) с установкой засверлиной на глубину 8 мм заготовки по наружной цилиндрической поверхности диаметром 28$\pm$9 в трехлучаковой выточке по месту кулачками. Параметры режима вибросверления: $S = 0,01 \text{ мм/об}$; $n_s = 1200 \text{ мин}^{-1}$; $f_n = 25 \text{ Гц}$; $i = 17/8$; $2A = 0,1 \text{ мм}$; СОЖ — 6%-ный водный раствор состава Аквол-10 (ТУ 38-2-01-220-75). Рас сверливание заготовок и получение отверстия $d = 8 \text{ мм}$, глубиной 35 мм осецировать с параметрами режима: $S = 0,09 \text{ мм/об}$; $n_s = 600 \text{ мин}^{-1}$; $f_n = 45 \text{ Гц}$; $i = 17/8$; $A = 0,03 \text{ мм}$. Контролировать размеры, отклонение от соосности, отсутствие ПН на поверхности отверстия $d = 4 \text{ мм}$ (в процессе настройки на обработку) и наличие таких неровностей на поверхности $d = 8 \text{ мм}$ (под заливку стеклом) с $h_n = 0,6...0,9 \text{ мкм}$ и $N_n = 220...260 \text{ см}^{-2}$. Контроль диаметральных размеров осуществлять пневмокалбрами на трех уровнях в двух перпендикулярных радиальных направлениях. Отделочную обработку корпусов датчиковых систем производить в условиях термостатного цеха	Вибросверление отверстия $d = 4 \text{ мм}$ осуществлять с использованием прецизионного патрона, поддерживающей кондукторной втулки и электрического отключающего устройства. Подобные требования предъявляются при обработке корпусов из титанового сплава ВТ3-1
Обработка подшипников аэродинамических датчиков весов ротаторов	Чаша КФ7040010 (БрО8С12) азимутального шарового гироскопа АШГ-100. Обработка рабочей сферической поверхности 101Н5 ($Ra_{\text{ср}} = 0,2 \text{ мкм}$, разноточность 0). Обработку осуществлять на станках мод. DLZ-315, DLZ-400, 1Т61МТ, SV18R. Заготовку базировать по торцу и резать хвостовик и закреплять путем вкручивания его в резьбовое отверстие оправки. Настройку на обработку осуществлять по инструкции КФ0.045.478. Обработку производить с помощью приспособления 3210-0054 с поворотным столом для инструмента. Для раскатывания, виброраскатывания, алмазного выглаживания	Раскатывание и обработку ПШД осуществлять за одну установку заготовок. Работу осуществлять по существующей технологии с воздействием в конце доводки

Обработка трубок устройств ку- мулятивного действия	и вибровыглаживания сферической поверхности использовать малогабаритные паровую 1100-3229 и алмазную 1100-3228 головки. Настройку по индивидуальному шару (ротору) и обработку производить по инструкциям КФ0.045.195 и С50.045.018. После растачивания с обеспечением микрогеометрии с $Ra_{гр} = 0,8$ мкм осуществить раскатывание (вибораскатывание) шаром диаметром 5...8 мм или выглаживание (вибровыглаживание) алмазным наконечником с $r_c = 2,5...4$ мм в режиме: $n_t = 300...315 \text{ мин}^{-1}$ (переменная скорость обработки от 1,9...2 до 80...84 м/мин); $P = 10...25 \text{ Н}$; $S = 0,02...0,06 \text{ мм/об}$; $n_{\text{max}} = 1200...1500 \text{ мин}^{-1}$; $2A = 0,5 \text{ мм}$; $i = 1,9...2,4$. Контролировать Ra , отсутствие ПН, точность поверхности. Изготовление чаш гироскопов и других подшипников аэродинамических подвесов роторов производить в изолированном от внешней среды помещении с постоянной температурой ($293 \pm 0,2 \text{ К}$) и контролируемыми уровнями загрязнения и влажности воздуха	сухим (без алмазной пасты) притиром. При этом обеспечивать $Ra = 0,1$ мкм и поверхность с ПН разноразно-сти 1 ($h_u = 0...0,05 \text{ мкм}$; $N_u \leq 80 \text{ ПН/мм}^2$). Допускается обеспечивать ПН на поверхности шара вибровыглаживанием алмазным наконечником в режиме создания ЧМР с указанными выше значениями h_u и N_u
	Трубка Эд3-62-41 (медь МПН). Обработка отверстия диаметром 5Н7 ($Ra_{гр} = 0,4 \text{ мм}$; разноразно-сти 0). При длине детали 54 мм заготовку отрезать размером 70 мм и засверлить на глубину 10 мм. Вибросверление осуществлять на установке ВУ-1 (ВУ-2, ВУ-6) вибросверлами, армированными твердым сплавом ВК6, с использованием патрона с расточенными кулачками, пресинхронного механического патрона и устройства с поддерживающей кондукторной втулкой. Параметры режима вибросверления: $S = 0,030...0,035 \text{ мм/об}$; $n_t = 1800...2000 \text{ мин}^{-1}$ ($v = 28...31 \text{ м/мин}$); $f_u = 70...75 \text{ Гц}$; $2A = 0,08...0,1 \text{ мм}$; $i = 9/8...17/8$ ($i_u = 1/8$). Контролировать диаметр инвеккалибром на трех уровнях в двух радиальных направлениях, микрогеометрию поверхности (Ra , отсутствие ПН). Далее заготовку обработать в размер по длине в соответствии с чертежом детали с учетом разбивки отверстия на входе и выходе сверла. Отверстие принять за базу при дальнейшей обработке заготовки (обработка наружного конуса, резьбы, цилиндрической поверхности)	В случае необходимости вернуть отклонение отверстия от круглости на кругломере мод. 218 (2 % заготовок, обработанных по отверстию). Регламент распространяется на обработку других деталей с отверстиями малого диаметра (3...10 мм) и большой длины ($l/d \geq 10$), включая детали из никелевого ХН67ВМТЮ и титанового ВТ3-1 сплавов и других вязкопластичных материалов

Окончание табл. 2.42

Наименование регламента и операции	Наименование и материал детали, технические требования к ней и содержание регламента	Примечание
Обработка корпусных деталей глухо-боковой аппаратуры	Корпус 241.80.103 [сплав АК9 (АЛ4)]. Обработка наружной фасонной поверхности (кавалитет точности 7, уровень относительной геометрической точности В, поверхность с $Ra_{cr} = 0,4$ мкм, разновидность 2). Обработку осуществлять на станке мод. 1К62 с помощью копирного устройства 6708-4001-03. Заготовку устанавливать отверстием большой горловины ($D_3 = 300$ мм) и торцом на палец планшайбы и ее кольцевую поверхность и поджимать центром задней бабки через планшайбу, устанавливаемую напильником и плоскостью по отверстию торцу малой горловины. Виброраскатывание после обогащения фасонной поверхности по копиру осуществлять профилем синусоидальным роликом ($d_p = 45$ мм, $r_p = 4$ мм) с помощью приспособления 1310-0061, в котором цапга для установки алмазного наконечника заменена на валку с роликом. Режим вибронакатывания: $P = 150...230$ Н; $S = 0,07...0,15$ мм/об; $n_3 = 90...100$ мин ⁻¹ ($\tau = 60...110$ м/мин). Детали контролировать по размерам, форме (шаблон, щуп), микрогеометрии (Ra_{cr} , наличие ПН с $h_n \leq 0,2$ мкм; $N_n = 80...160$), испытывать на герметичность пневмодавлением 0,5 МПа и на прочность гидродавлением 2,5 МПа	В случае повышенной пористости литого металла допускается обрабатывать фасонную поверхность ППД в одном режиме дважды. Поверхность вида 2 обеспечивается вибронакатыванием фасонной поверхности профилем роликами в режиме создания ЧРМР и обеспечением $F_n = 48...52$ %; $h_n = 1...1,24$ мкм
Обработка деталей хронометрических и акустических устройств	Корпуса часов и хронометров (Л63). Обработка поверхности штампованной с подогревом заготовки под лакокрасочное покрытие и нанесение шкал ($Ra_{cr} = 0,2$ мкм, разновидность 0 до гальванического покрытия и разновидность 2 после гальванического покрытия никелем или хромом). До гальванического покрытия обработку поверхности производить протачиванием резцом ($Ra_{cr} = 0,4$ мкм) на токарном станке мод. ТВ-320 или «Лайнен». Алмазное выглаживание осуществлять наконечником с $r_c = 2$ мм ($Ra_{cr} = 0,1$ мкм) в режиме: $P = 25...50$ Н; $S = 0,03...0,04$ мм/об; $n_3 = 250...300$ мин ⁻¹ . После гальванического покрытия обеспечить установку корпусов в приспособление с биением	При обработке поверхностей с хромовым покрытием силу обработки увеличивать в 1,5 раза или снижать на 0,5 мм радиус сферы алмазного наконечника при уменьшении подачи до 0,003...0,04 мм/об. Регламент можно использовать

поверхности, не превышающим 0,003 мм, и осуществить алмазное выглаживание поверхности в режиме (никелевое покрытие): $P = 15...25$ Н; $S = 0,05...0,08$ мм/об; $n_s = 150...150$ мин ⁻¹ ; СОЖ – масло индустриальное И-12А с последующей промывкой в бензине «Калоша». Контролировать микрогеометрию поверхности (Ra , наличие ПН с $h_n \leq 0,1$ мкм; $N_n = 160...220$ ПН/мм ²). Обработку и контроль деталей производить в условиях повышенной чистоты помещений и воздуха	при обработке крышек акустических устройств

Примечание. Все другие параметры качества деталей в случае необходимости можно контролировать по табл. 2.8.

2.5.3. Экономическая эффективность и направления развития прогрессивной технологии

Для определения экономической эффективности технологического улучшения эксплуатационных свойств деталей и соединений за счет применения прогрессивной технологии наиболее приемлемой следует признать методику расчета, которая учитывает не только себестоимость изготовления деталей, но и расходы, связанные с эксплуатацией деталей и изделий.

В табл. 2.43 приведены условные данные по экономической эффективности использования одной виброустановки ВУ-1 и вибросверления вязкопластичных сплавов на одном из киевских заводов [5, 9].

Таблица 2.43

Экономические показатели использования виброустановки ВУ-1 и вибросверления

Показатель	Новый техпроцесс (вибросвер- ление на ВУ-1)	Старый техпроцесс (сверление на станке мод. 1Е61МТ)
Производительность, шт./ч	26	17
Мощность, кВт	6	4
Количество рабочих в смену на оборудовании для сверления и их разряд, чел./разряд	1/3	2/5
Соотношение трудозатрат на единицу продукции, у.е.	0,486	1
Соотношение зарплаты рабочих, обслуживавших оборудование для сверления, в смену, у.е.	0,373	1
Соотношение стоимости единицы оборудования, у.е.	1,1	1
Экономический эффект от применения виброустановки мод. ВУ-1, у.е./год	4 390	—
Экономический эффект от сокращения расходов на инструмент, у.е./год	15 240	—
Экономический эффект от повышения качества и снижения брака, у.е./год	8 240	—
Общий экономический эффект от использования установки мод. ВУ-1 и вибросверления, у.е./год	27 870	—

Из табл. 2.43 следует, что в течение года экономический эффект составил: за счет использования самой установки 4390 у.е., за счет повышения качества деталей и снижения брака 8240 у.е., за счет сокращения расходов на инструмент 15 240 у.е. Следует отметить также, что производительность оборудования возросла на 53 %.

В табл. 2.44 приведены данные по экономическому эффекту использования прогрессивной технологии в условиях одного из алтайских приборостроительных заводов для шести деталей и одного инструмента.

При расчете экономической эффективности только по снижению себестоимости деталей, обработанных ППД, экономический эффект составил 12 810 у.е., а при выполнении расчета с учетом улучшенных эксплуатационных свойств деталей и соединений (пар) и сокращения расходов на эксплуатацию изделий годовой экономический эффект от внедрения прогрессивной технологии по указанным выше изделиям в соответствии с табл. 2.44 составил 20 990 у.е.

В целом определение экономической эффективности с учетом улучшения эксплуатационных свойств деталей и соединений повышает точность экономических расчетов в среднем на 40 %. Прогрессивная отделочно-упрочняющая обработка повышает производительность изготовления деталей в среднем на 50 % и снижает их технологическую себестоимость до 53 %. При этом эксплуатационные расходы, связанные с вынужденной заменой деталей и сборочных единиц, при применении отделочно-упрочняющей обработки ППД и комбинированной обработки снижаются в 1,5...2 раза.

Лишь по неполным данным процессы вибронакатывания, вибровыглаживания и другие способы управления микрогеометрией рабочих поверхностей и свойствами подповерхностного слоя материалов деталей внедрены более чем на 500 предприятиях 20 отраслей с общим экономическим эффектом, превышающим 30 млн у.е. [15, 20].

Дальнейшее развитие направления по технологическому обеспечению эксплуатационных свойств деталей и соединений должно идти по пути совершенствования оценки микрогеометрии рабочих поверхностей деталей, стандартизации новых параметров и ее метрологического обеспечения; накопления сведений о взаимосвязи эксплуатационных свойств с качеством поверхности и подповерхностного слоя деталей из различных вязкопластичных материалов,

Таблица 2.44

Показатели экономической эффективности

Детали и инструмент	Способ обработки	Затраты на материал для одной детали, у.е.	Количество деталей в год, шт.	Количество выужденных замен деталей (пар) в год	Приведенные годовые затраты, у.е./деталь	Экономический эффект, у.е./год
а, б	Д AB	0,230 —	— 475	6 0	20,38 7,73	— 6010
в, г	Ш Т + Н	2,525 —	— 60	2 1	38,26 19,76	— 1110
д	Т + Д Т + АВ(Н)	4,66 —	— 72	4 2	57,23 27,80	— 2120
е	Т + Ш Т + ВН	35,100 —	— 392	2 1	99,40 79,11	— 7950
ж	Д AB + BV	0,025 —	— 1760	Время эксплуатации увеличивается в 3 раза	3,15 0,99	— 3800

Примечание. а — цилиндр демифера 241 07 1068; б — поршень демифера 241 07 1069; в — пакет якоря малогабаритного следящего трансформатора (МСТ) КФ668001; г — магнитопрод (пакета статора) МСТ КФ644023; д — чаша АШГ-100 КФ7040010; е — корпус аппаратуры 241 80 103; ж — калибры (пробки) диаметром 12...22 мм. Д — доводка, АВ — алмазное выглаживание, Ш — шлифование, Т — точение, Н — накатывание, ВН — вибронакатывание, BV — вибровыглаживание.

их анализа и обобщения; совершенствования методов прогнозирования точности и микрогеометрии рабочих поверхностей; применения прогрессивных способов формообразования деталей (порошковая металлургия, пластическое формообразование и др.); создания способов обработки с переменными и управляемыми от ЭВМ параметрами режима; использования комбинированных и совмещенных процессов воздействия на обрабатываемые поверхности и материалы; разработки и серийного выпуска специализированного оборудования; систематизации и стандартизации систем прогрессивного инструмента и приспособлений для ППД; расширения внедрения прогрессивной технологии в производство и ее обработки непосредственно на промышленных предприятиях.

Изложенные выше исследования, обобщения их результатов осуществлены сотрудниками втузов и заводов во многом с участием студентов. При этом использованы теоретические основы научных исследований, методики обработки их результатов и другие материалы, отраженные в гл. 1 настоящего пособия.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Опишите условия, в том числе экстремальные, в которых эксплуатируются изделия машино- и приборостроения.
2. Какие требования предъявляются к материалам, деталям и соединениям в зависимости от условий и сред их эксплуатации?
3. Каково влияние микрогеометрии рабочих поверхностей на эксплуатационные свойства деталей и соединений?
4. Каково влияние физико-химического состояния подповерхностного слоя материала на эксплуатационные свойства деталей и соединений?
5. Перечислите эксплуатационные свойства деталей и соединений.
6. Для чего необходимо накапливать научно-исследовательские данные по поведению деталей и соединений в изделиях?
7. В каких направлениях идет развитие теории микрогеометрии технических поверхностей?
8. В чем заключается проблема метрологического обеспечения новых подходов к оценке микрогеометрии технических поверхностей?
9. Как и по каким ГОСТам микрогеометрия технических поверхностей разграничивается на два основных вида?
10. Дайте характеристику взаимодействию реальных поверхностей деталей с твердыми телами, эластиком, жидкостями, газом и покрытиями.
11. Опишите механизмы возникновения несимметричных неровностей при обработке резанием труднообрабатываемых вязкопластичных материалов.

12. Как осуществляется моделирование микрогеометрии технических поверхностей?
13. Приведите классификацию ПН.
14. Перечислите способы оценки поверхностей с ПН и дайте им характеристику.
15. Опишите научно-техническое обеспечение новых способов оценки микрогеометрии поверхностей вязкопластичных материалов.
16. Приведите математическую модель поверхности с ПН.
17. В чем заключается и для чего осуществляется имитационное моделирование ПН?
18. Приведите классификацию технических поверхностей по наличию и отсутствию ПН.
19. Приведите примеры положительного и отрицательного влияния ПН на эксплуатационные свойства деталей и соединений.
20. Каким образом возможно нормировать микрогеометрию рабочих поверхностей деталей в стадии проектирования изделий?
21. Какие научно-технические подходы используются при выборе методов и способов обработки поверхностей заготовок деталей?
22. Какими параметрами задается качество рабочих поверхностей прецизионных деталей?
23. Какова сущность регуляризации микрогеометрии технических поверхностей?
24. Каковы особенности и достоинства РМР рабочих поверхностей деталей?
25. Приведите классификацию стандартизованных РМР.
26. Каково различие между ОУРМР и ДУРМР?
27. Какова роль стандартизации по ГОСТ 24773–81 в научных исследованиях и в промышленности?
28. Как возникают РПН и когда они являются положительным явлением?
29. Как обеспечиваются требуемые несущая способность и маслосъемность поверхностей при регуляризации их микрогеометрии?
30. Приведите примеры инструментов и приспособлений для безвибрационной обработки различных поверхностей ППД.
31. Приведите схему деформации подповерхностного слоя материала сферическим инструментом.
32. Опишите оснастку для вибрационной обработки ППД с источниками вибрации (виброголовками).
33. Опишите инструменты и приспособления для вибрационной обработки без источников вибрации.
34. В чем заключается модернизация и автоматизация стандартного металлорежущего оборудования для обработки ППД?
35. Приведите примеры комбинированной и совмещенной обработки резанием и ППД.

36. Как меняются параметры микрогеометрии поверхностей после обработки ППД?
37. Приведите методику расчета параметров РМР.
38. Каким образом меняются физико-механические параметры подповерхностного слоя материала при ППД?
39. Каким образом технологически обеспечиваются параметры РМР?
40. Приведите методику расчета и проектирования профильных роликов.
41. Перечислите разновидности фасонных и профильных роликов для образования РМР.
42. Приведите рекомендации по применению СОЖ при обработке труднообрабатываемых сплавов резанием и ППД.
43. На какие эксплуатационные свойства деталей влияет изменение микрогеометрии их поверхностей?
44. Какое влияние на эксплуатационные свойства деталей оказывает упрочнение их подповерхностного слоя при ППД?
45. Какими путями можно прогнозировать и обеспечивать заданную точность размеров и формы деталей при ППД?
46. Приведите характеристику и математическую модель прецизионной настройки на обработку ППД.
47. Каким методом можно исследовать размерную стабильность тонкостенных деталей из титана, предрасположенного к ползучести?
48. Приведите схему исследования коэффициента трения поверхностей деталей и соединений.
49. Опишите метод исследования прирабатываемости поверхностей пар трения.
50. Приведите схемы исследования и показатели износостойкости пар трения.
51. Приведите схемы исследования схватывания и противозадирности пар трения.
52. Перечислите методы исследования магнитоэлектрических свойств деталей с различной обработкой.
53. Как может исследоваться чувствительность сдвига и плавность хода деталей в соединениях?
54. Как исследуются и технологически обеспечиваются ламинарность перемещения газов в аэродинамических подшипниках и кумулятивность струи?
55. Как исследуется и обеспечивается повышенная герметичность литых деталей обработкой ППД?
56. Как можно повысить ресурс работы подвижных соединений по гидро- и пневмоплотности?
57. Изменяется ли при обработке ППД коррозионная стойкость деталей?
58. Улучшается ли и за счет чего адгезия покрытий при обработке исходной поверхности ППД?

59. Как влияют факторы, обеспечиваемые обработкой ППД, на прочность неразъемных соединений?
60. Приведите примеры декоративной отделки деталей бытовой техники путем образования на их внешних поверхностях РМР.
61. В каких отраслях промышленности наиболее эффективно исследуются и используются технологии, улучшающие эксплуатационные свойства деталей?
62. Какими путями создается нормативная база в виде технологических регламентов, инструкций и методик по применению новых технологий в машино- и приборостроении?
63. Как определяется экономическая эффективность применения новых технологических процессов с учетом улучшения эксплуатационных свойств и повышения ресурса безотказной работы деталей и соединений?
64. Перечислите основные направления исследований и развития прогрессивных технологий, включая нанотехнологии.



ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ



3.1. Сущность наноструктур и их технологий

Приставка «нано» означает одну миллиардную долю (часть), например, метра — 1 нанометр (нм) = 10^{-9} м. Ангстрем (Å) является одной десятой долей нанометра: Å = 0,1 нм.

Под наноструктурными материалами (нанокристаллическими, нанокомпозитными, нанофазными, нановолокнистыми и т.п.) понимаются материалы, основные структурные элементы которых (кристаллы, слои, поры, волокна) не превышают по размеру 100 нм = 0,1 мкм, по крайней мере, в одном направлении.

Под термином «нанотехнологии» понимаются действия по созданию и использованию материалов, структура которых регулируется в нанометровом масштабе (0,1...100 нм), т.е. по сути подразумевает методы и способы работы с указанными нанообъектами и создание из них более крупных структур на базе использования молекулярной организации. По выражению академика РАН В.Я. Шевченко, эти технологии обеспечивают вместо традиционной обработки «сверху вниз» обработку «снизу вверх» путем молекулярного дизайна изделия из элементарных частичек природы в виде атомов и молекул. Нанотехнологии, по мнению ученого, могут изменить мир путем создания более миниатюрных изделий с уменьшением затрат на материалы и их транспортировку, отходов производства и т.п.

Идея атомно-молекулярной архитектуры была впервые блестяще подтверждена в 1990 г., когда компанией IBM посредством сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) была сложена аббревиатура IBM из 35 ксеноновых атомов на грани никелевого монокристалла.

Термин «нанокристаллические материалы» был введен в 1981 г. Г. Глейтером, а позже стали использоваться термины «наноструктурные», «нанофазные», «нанокомпозитные», «наноразмерные» и другие материалы. Главная роль в концепции наноматериалов отведена поверхностям раздела (границам зерен) как фактору, позволяющему существенно изменить характеристики твердых тел путем модификации структуры и электронного строения, а также за счет легирования химическими элементами независимо от размеров их атомов и типа химической связи. Глейтером был также предложен метод получения наноматериалов, заключающийся в сочетании изготовления ультрадисперсных порошков (нанопорошков) путем испарения-конденсации с их последующей вакуумной обработкой при высоких давлениях, что обеспечило, например, получение дискообразных образцов диаметром до 10...20 мм и толщиной до 0,1...0,5 мм.

Изучение малоразмерных объектов (порошков, коллоидов, катализаторов, пигментов, кластеров — зон с повышенной концентрацией приместного компонента, образующего скопление атомов в решетке матрицы пересыщенного твердого раствора, пленок и т.д.) и квантовых размерных явлений (взаимодействия частиц очень малой массы — атомов, электронов, протонов) осуществлялось с доисторических времен. Расширение интереса к наноявлениям в последнее время обусловлено тремя основными наиболее весомыми обстоятельствами:

□ методы нанотехнологии позволяют получать принципиально новые материалы и устройства, характеристики которых значительно превосходят современный уровень, что очень важно для развития многих областей науки, техники, охраны окружающей среды;

□ наноматериалы и нанотехнологии совершенствуются на стыке наук, вовлекая в решение возникающих проблем ученых разных специальностей, стимулируя научно-технический прогресс в целом;

□ решение проблем нанотехнологии выявило массу пробелов как в фундаментальных, так и в технологических знаниях и способствует концентрации внимания ученых в этом направлении.

Наука о малоразмерных объектах — это прежде всего совокупность знаний о веществах и явлениях в нанометровом масштабе, особенностях наноструктурного материаловедения. Среди наноструктурных материалов можно выделить несколько основных разновидностей: консолидированные (уплотненные, срощенные, упрочненные, укрепленные) материалы, нанополупроводники, нанополимеры, нанобиоматериалы, фуллерены и тубулярные наноструктуры, нанопористые материалы, супрамолекулярные структуры.

К консолидированным наноматериалам относятся компоненты, пленки и покрытия из металлов, сплавов и соединений, получаемые методами порошковой металлургии, интенсивной пластической деформации, контролируемой кристаллизации из аморфного состояния и разнообразными способами нанесения пленок и покрытий. Нанозерна (кристаллы) этих материалов находятся не в виде отдельных изолированных образований или в слабосвязанном виде, а в консолидированном состоянии с обеспечением высокой прочности межзеренных прослоек и взаимосвязей.

Нанополупроводники, нанополимеры и нанобиоматериалы могут быть как в изолированном, так и в частично консолидированном состоянии, образуя гибридные (смешанные) материалы.

Фуллерены, включая тубулярные (трубчатые) наноструктуры, стали предметом многочисленных исследований и внимания практических работников с 1985 г., когда была идентифицирована новая аллотропная форма углерода — кластеров C_{60} и C_{70} , названных так авторами Н. Крото, Р. Керлу и Р. Смолли в честь знаменитого американского инженера и архитектора ячеистых куполов Р. Бакминстера Фуллера. Внимание к этим материалам возросло с 1991 г., когда японский ученый С. Ишима обнаружил углеродные нанотрубки в продуктах электродугового испарения графита.

Фуллерены (в твердом состоянии иногда называются фуллеритами) представляют собой кластеры углерода с числом атомов от нескольких десятков и выше. Число атомов углерода в кластере не произвольно, а подчиняется закономерности: 32, 44, 50, 58, 60, 70, 72, 78, 82, 84 и т.д. Все они имеют близкую к сферической форму и состоят из шести- и пятиугольных ячеек диаметром около 1 нм. Наибольший интерес и практическую ценность представляют фуллерены C_{60} и C_{70} ввиду их наибольшей стабильности и высокой симметрии. Схемы молекул C_{60} и C_{70} показаны на рис. 3.1, а, б.

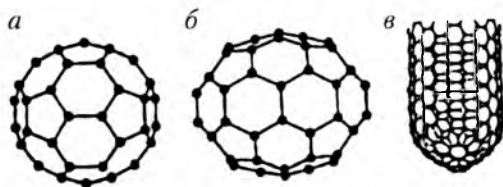


Рис. 3.1. Схемы строения фуллеритовых структур:
а — фуллерена C_{60} ; *б* — фуллерена C_{70} ; *в* — однослойной нанотрубки с закрытым торцом

Молекулы C_{60} и C_{70} представляют собой полые формы, первая — в виде футбольного мяча, вторая — в виде регбийного. Свободных связей у молекул C_{60} и C_{70} нет, чем объясняется их большая химическая и физическая устойчивость, а также наибольшая среди аллотропов углерода чистота (незагрязненность). Шарообразные молекулы C_{60} и C_{70} могут соединяться друг с другом в твердом теле с образованием гранецентрированной кубической кристаллической решетки. Диаметр молекулы, например, C_{60} равен 0,7024 нм. По своим электронным свойствам кристаллы чистого C_{60} и C_{70} и многих комплексов на их основе представляют собой новый класс полупроводников, чрезвычайно интересных как с чисто фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения широты практического применения. Также возможно состояние гипермолекул углерода в виде нанотрубки — тубуляры, закрытой на концах шапочками из половинок гипермолекул C_{60} или C_{70} или без них. Однослойная нанотрубка с закрытым торцом показана на рис. 3.1, *в*. Нанопористые материалы характеризуются размером пор, как правило, менее 10 нм. Супримолекулярные структуры — это наноструктуры, получаемые в результате нековалентного синтеза с образованием слабых связей между молекулами и их ансамблями.

Наночастицы нанопроводников — это малоразмерные твердые вещества, геометрический размер которых находится в пределах от нескольких ангстремов до 100 нм. Считается, что наночастицы указанных размеров переходят в кластеры, содержащие от десяти до нескольких тысяч атомов.

Термины «нанопорошки» и «ультрадисперсные порошки» можно считать синонимами.

3.2. Средства исследования и особенности наноструктур



Бурное развитие нанонаправления в науке, материаловедении и технологии привело к необходимости совершенствования методов и средств исследования наноструктур и выявления их особенностей. Наряду с рентгеноструктурным анализом (РСА) и зондовыми электронно-микроскопическими методами, потребовалось использование современной просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), которая позволяет визуализировать и исследовать наноструктурные области, обладая разрешением вплоть до атомарного, проводить детальный анализ атомно-молекулярных расположений. Использование плоскопараллельного освещения или сходящихся электронных пучков при получении дифракционных картин в электронном микроскопе (ЭМ) дает возможность посредством его изучать угловые распределения рассеянных в образце электронов, что сближает методы ПЭМ и РСА.

Помимо структурных исследований, ПЭМ позволяет определить химический состав материала, используя спектроскопию энергетических потерь быстрых электронов. Достижимое пространственное разрешение при этом может быть лучше 1 нм, что дает возможность непосредственного определения элементного состава, как нанобразований в материалах, так и отдельных наночастиц. Таким образом, современная ПЭМ позволяет проводить всесторонние структурно-аналитические исследования наноматериалов.

Основой для изучения и идентификации структуры являются дифракционные картины и электронно-микроскопические изображения. При их получении основную роль играют электроны, прошедшие через тонкий образец материала в виде фольги толщиной в доли микрометра без потери энергии или, другими словами, рассеянные в нем упруго.

Для аналитических исследований, напротив, важными являются электроны, которые вступают в неупругие взаимодействия с атомами образца. Теряя энергию, они возбуждают колебания атомов кристаллической решетки (фононы) и плотности валентных электронов (плазмоны) или ионизируют внутренние атомные оболочки, обуславливая возникновение характеристического рентгеновского

излучения. Измерение интенсивности этого излучения посредством энергодисперсионного рентгеновского спектрометра позволяет определять состав в облучаемой электронным пучком области образца. Химсостав может быть также установлен на основе зависимости интенсивности неупруго рассеянных электронов от значения потерянной ими энергии, называемой спектром энергетических потерь быстрых электронов. Такие зависимости получаются с помощью спектрометра энергетических потерь с системой регистрации, изображенных на экране просвечивающего ЭМ (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Схема просвечивающего ЭМ

В качестве источника электронов в электронной пушке микроскопа используются катоды из вольфрама (W) или гексоборида лантана (LaB_6), испускающие электроны вследствие явления термоэлектронной эмиссии. Катоды из LaB_6 по сравнению с катодами из W обеспечивают повышенный ток электронного пучка и меньший разброс в энергии вылетающих из пушки электронов. Меньший энергоразброс, повышенная плотность тока, высокая когерентность (согласованное протекание) электронного пучка позволяют получать также источники с полевой (управляемой) эмиссией электронов.

Осветительная система микроскопа включает 2–3 линзы и позволяет варьировать освещение образца от широкого, почти параллельного падающего пучка до сфокусированного электронного зонда с поперечными размерами до 1 нм.

Столик и держатели образца позволяют не только менять ориентацию исследуемого объекта относительно электронного пучка, но и видеть изменения структуры материала, вызываемые нагревом-охлаждением, приложением механических воздействий и т.п. Объективная линза является основой достижения четкости и достоверности изображения.

Создание сканирующего туннельного (СТМ) и атомно-силового (АСМ) микроскопов активизировало развитие новых типов сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ), которые позволяют изучать локальные характеристики с пространственным разрешением. В таких микроскопах острый щуп (зонд, игла) подводится к исследуемой поверхности на расстояние 1...10 Å, что дает возможность проводить измерения, недоступные для традиционных методик. Схема сканирующих зондовых методов исследования представлена на рис. 3.3.

Предварительное позиционирование образца осуществляется трехкоординатным (x, y, z) моторизованным столиком. Тонкое позиционирование зонда реализуется трехкоординатными 3D-пьезосканерами, позволяющими перемещать зонд с точностью в долях ангстрема на десятки микрометров по осям x, y, z .

Управление процессом осуществляется рабочей системой от программного обеспечения, через контроллер, являющийся электроаппаратом с большим числом контактов, коммутирующих различные цепи, для приведения в действие пьезосканера, датчика

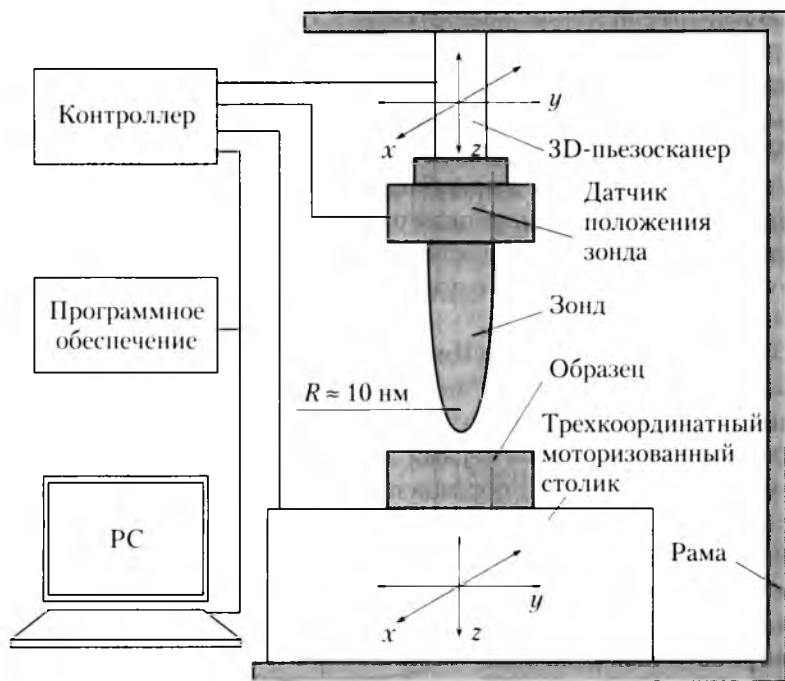


Рис. 3.3. Базовая схема сканирующих зондовых методов исследования и модификации поверхностей в нанотехнологии

положения зонда и трехкоординатного моторизованного столика с образцом в соответствии с программой.

Кроме исследовательских функций посредством СЗМ, реализуются активные функции, например захват отдельных атомов, перенос их в новую позицию, атомарная сборка проводников шириной в 1 атом, локальные химические реакции, манипулирование отдельными молекулами и т.п.

Обычно используется два способа манипулирования атомами иглой СЗМ: горизонтальный (рис. 3.4, а) и вертикальный (рис. 3.4, б). Вертикальный способ отличается от горизонтального тем, что после захвата нужный атом отрывается от поверхности путем поднятия на несколько ангстремов зонда. Для этого требуются большие силы, чем при «перекачивании» атомов по поверхности, но зато потом процесс переноса не зависит от препятствий на поверхности в виде

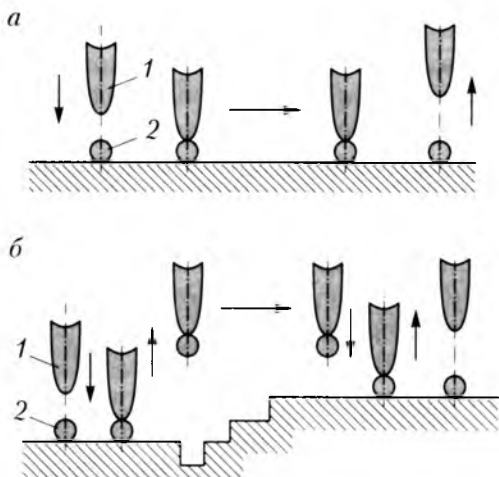


Рис. 3.4. Способы манипулирования и перемещения атомов по поверхности:

a — горизонтальный; *б* — вертикальный; 1 — игла СЗМ; 2 — намеченный к перемещению атом

ступеней, ям, адсорбированных атомов и др. Отрыв атома от поверхности контролируется по скачку тока. «Сбрасывание» атома в нужном месте осуществляется путем приближения острия к поверхности и переключения напряжения на игле. Значительные успехи при использовании зондовых методов достигнуты в нанолитографии — рисовании, например, на микросхемах в радиоэлектронике.

Эффекты, наблюдаемые в наномасштабных объемах, можно объяснить таким образом. Доля α атомов, находящихся в тонком приповерхностном слое толщиной около 1 нм, растет с уменьшением размера L частички вещества, так как $\alpha = S/V \sim L^2/L^3 \sim 1/L$, где S — площадь поверхности частицы; V — ее объем.

Атомы, расположенные на поверхности, обладают свойствами, отличающимися от «объемных», так как они связаны с окружающими их атомами по-другому, чем в объеме. Состав поверхностного слоя не соответствует стехиометрическому составу (количественному соотношению компонентов) химических соединений. Поэтому у поверхности происходит атомная реконструкция и появляется другой порядок расположения атомов. Миграция атомов вдоль

поверхности частиц происходит быстрее, чем в объеме. Наличие сил притяжения между ними приводит к самоорганизации и самосборке островных, столбчатых и других структур на подложке.

Для атомов, размещенных по краям монокристаллитных террас, уступов и впадин на них, где координационные числа (числа ближайших к данному атому соседних атомов в кристаллической решетке) ниже, чем в объеме, возникает особое условие. Взаимодействие электронов со свободной поверхностью приводит к появлению специфических приповерхностных состояний (уровней И.Е. Тамма). Изложенное дает основание для рассмотрения приповерхностного слоя как нового состояния вещества. В связи с этим принято, что наночастицами являются частицы, у которых доля поверхностных атомов превышает 10 % от общего их количества.

Поверхность по сути является «стоком» большинства дефектов кристаллической структуры почти бесконечной емкости благодаря воздействию сил «изображения» и других причин. Силы изображения убывают по мере удаления вглубь от поверхности, но если размер частичек достаточно мал, то они могут «высосать» из объема большинство дефектов и сделать его в структурном отношении более совершенным. Здесь уместно заключение, что наноструктурные материалы наилучшим образом проявляют свои свойства в тонких приповерхностных слоях, а также в наносистемных покрытиях и пленках. Это очень важно для машиностроительного и ремонтно-восстановительного производств.

Эксплуатационные и другие характеристики наноматериалов определяются их структурой. По классификации Г. Глейтера (рис. 3.5) по химическому составу и распределению фаз можно выделить четыре типа структуры неполимерных материалов: однофазные, статистические многофазные с идентичными и неидентичными поверхностями раздела и матричные многофазные.

Выделяются три типа структуры и по форме: пластинчатая (слоистая), столбчатая (волокнистая) и равноосная, содержащая равноосные включения. Эта классификация учитывает возможность разделения межкуристаллитных границ на идентичные и неидентичные поверхности раздела. В более широком смысле могут быть смешанные варианты наноструктур, наличие пористости, трубчатых структур, полимерных составляющих и т.п. Наиболее распространенными являются одно- и многофазные матричные

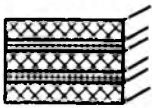
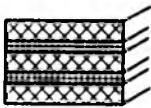
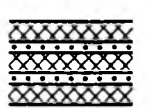
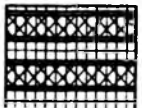
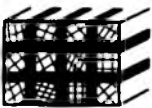
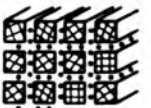
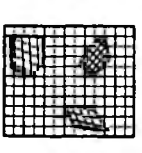
Форма	Однофазный состав	Многофазный состав		
		Статистическое распределение		Матричное распределение
		Идентичные границы	Неидентичные границы	
Пластиначатая				
Столбчатая				
Равноосная				

Рис. 3.5. Классификация разновидностей наноматериалов по составу, распределению и форме структурных составляющих

и статистические объекты, находящиеся в равновесии, столбчатые и многослойные структуры, которые характерны в основном для пленок.

На рис. 3.6 показаны снимки типичных структур консолидированных наноматериалов, полученных: *а, д–к* — посредством просвечивающих электронных микроскопов; *б, в* — посредством сканирующего электронного микроскопа; *г* — с помощью АСМ с увеличением 20 000...3 500 000 раз. Столбчатые и пластиначатая структуры пленок представлены на рис. 3.6, *в–д*; однофазные структуры — на рис. 3.6, *а, г, ж*; многофазные — на рис. 3.6, *д, е, з–к*.

В целом для структур наноматериалов характерно обилие поверхностей раздела: межзеренных границ, тройных стыков — линий встречи трех зерен.

Схема тройного стыка, образованного зернами в виде тетраэдрических додекаэдров (двенадцатигранников), показана на рис. 3.7, *а*, график зависимости общей доли поверхностей раздела, доли собственно межзеренных и доли тройных стыков от размера зерен —

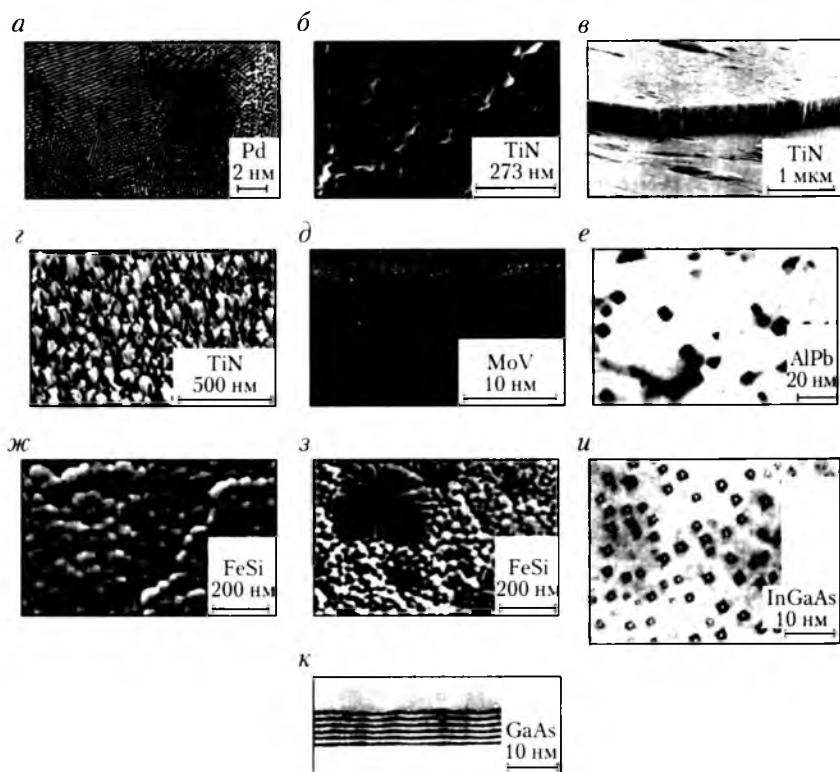


Рис. 3.6. Микрофотографии наноструктур

на рис. 3.7, б. График построен на основании геометрических подходов: общая доля поверхностей раздела

$$V_{п.р} = 1 - [(L - s)/L]^3 \sim 3s/L.$$

Доля собственных межзеренных границ

$$V_{м.г} = [3s(L - s)^2/L]^3,$$

доля тройных стыков

$$V_{т.с} = V_{п.р} - V_{м.г}$$

Здесь L — размер зерна, s — ширина границы (приграничной зоны).

Из графика следует, что существенная доля поверхностей раздела зерен (несколько процентов) отвечает размеру зерен $L < 100$ нм;

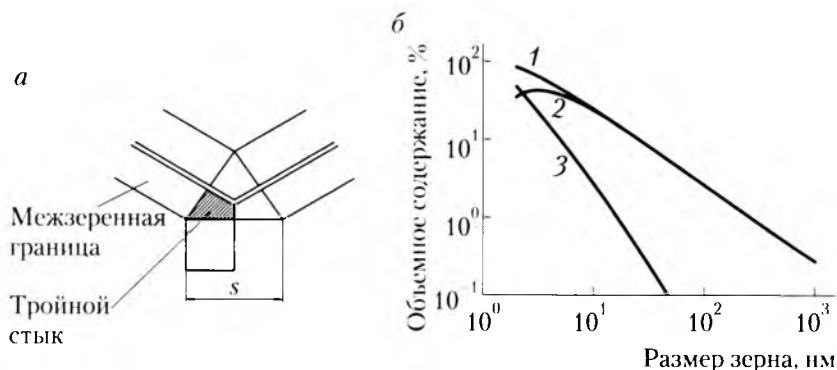


Рис. 3.7. Схема тройного стыка (а) и влияние размера L зерна (б) на общие доли поверхностей раздела (1), межзеренных границ (2) и тройных стыков (3) при ширине границы (приграничной зоны) $s = 1$ нм

при $L < 10$ нм доля $V_{п.р}$ составляет уже несколько десятков процентов, причем в этом интервале значений L доля тройных стыков стремительно растет. Доля поверхностей раздела в общем объеме материала приблизительно равна $3s/L$, где при $s \approx 1$ нм доля $V_{п.р} = 50\%$ достигается при L около 6 нм. Таким образом, если твердое тело состоит из кристаллитов размером в несколько нанометров (меньше 10 нм), то доля поверхностей раздела или доля областей с разупорядоченной структурой весьма велика.

Основные методы и способы получения консолидированных материалов представлены в табл. 3.1.

Приведенные в табл. 3.1 методы и способы не конкурируют, а дополняют друг друга, расширяя спектр структур их характеристик и практических приложений.

Таблица 3.1

Методы и способы получения консолидированных материалов

Метод	Способы	Объекты
Порошковая технология	Газофазное осаждение и компактирование (метод Глейтера). Обычное прессование и спекание. Электроразрядное спекание. Горячая обработка давлением (горячее прессование, ковка, экструзия)	Металлы, сплавы, соединения

Окончание табл. 3.1

Метод	Способы	Объекты
Интенсивная пластическая деформация	Деформация кручением при высоких давлениях. Равноканальное угловое прессование. Обработка давлением многослойных композиций. Фазовый наклеп	Металлы и сплавы
Контролируемая кристаллизация из аморфного состояния	Кристаллизация при обычном давлении. Кристаллизация при повышенном давлении	Аморфные вещества
Технология пленок и покрытий	Химическое осаждение из газовой фазы. Физическое осаждение из газовой фазы. Электроосаждение. Золь-гель технология	Металлы, сплавы и соединения

Большое разнообразие наноматериалов вызвано эксплуатационными требованиями к ним. Для примера можно рассмотреть нанопористые и трубчато-тубулярные структуры.

В качестве основы нанопористых материалов используются естественные и искусственные структуры (в том числе и слоистые) на основе силикатов, глин, полимеров и других подобных материалов, в полостях которых могут размещаться металлические и неметаллические наночастицы, а также молекулярные ансамбли.

На рис. 3.8 показано темнопольное изображение сотовой структуры материала с порами диаметром 2...10 нм, полученное посредством электронного микроскопа.

Трубчато-тубулярные структуры представлены в настоящее время не только углеродными нанотрубками, но и аналогичными структурами нитрида бора (BN), дисульфида молибдена (MoS_2) и ряда металлов. Рисунок 3.9 иллюстрирует строение однослойных и многослойных нанотрубок. Однослойные трубки образуются в результате свертывания полос атомных сеток графита (графенов) в бесшовные цилиндры. Структурная особенность нанотрубок определяется относительной ориентацией гексагональной графитовой сетки относительно продольной оси трубок. Для этих трубок различаются три возможных варианта свертывания: А — в виде гофр (кресло), когда две стороны каждого шестиугольника ориентированы

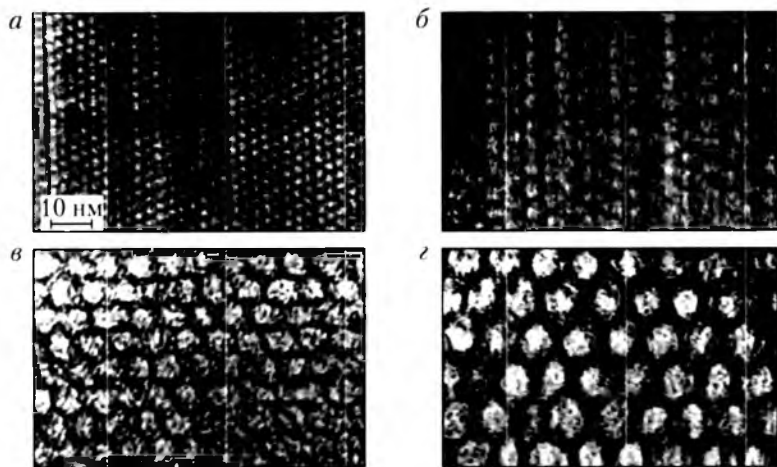


Рис. 3.8. Электронные микрофотографии алюмосиликатного цеолита MCM-41 с порами диаметром 2 (*а*), 4 (*б*), 6.5 (*в*) и 10 (*г*) нм

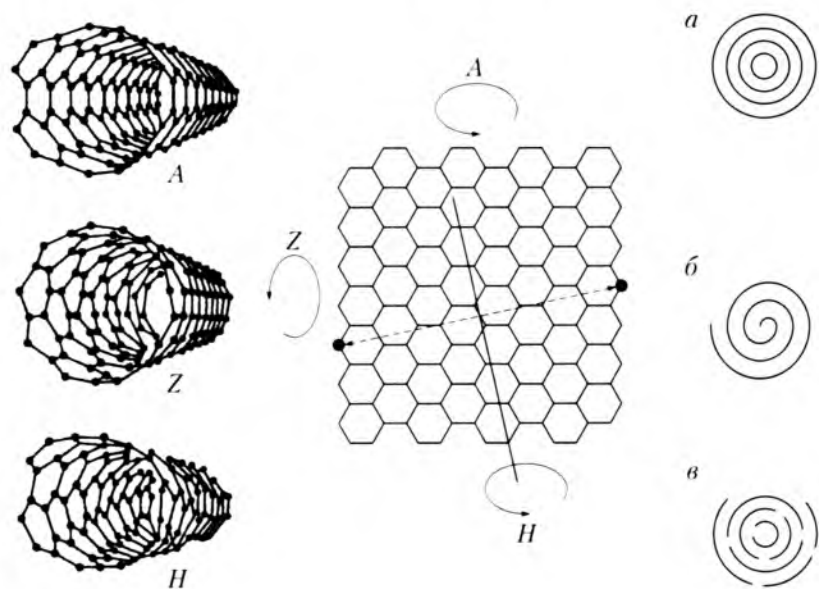


Рис. 3.9. Схемы свертывания однослойных нанотрубок типов: гофр (*А*), зигзаг (*З*), хиральный (*Н*) и строение многослойных нанотрубок видов: *а* — «русская матрешка»; *б* — рулон (свиток); *в* — панье-маше

перпендикулярно оси трубки; Z — типа зигзаг, в этом случае две стороны каждого шестиугольника ориентированы параллельно оси трубки; H — спиралевидный (хиральный) тип, когда каждая пара сторон шестиугольников ориентирована к оси трубки под углом, отличным от 0 и 90° .

Трубки могут быть и многослойными, т.е. состоять из нескольких цилиндров один в другом (рис. 3.9, *а*), иметь вид рулона (рис. 3.9, *б*), смешанной системы с надрывами (рис. 3.9, *в*). Внутренний диаметр трубок изменяется от долей нанометра до нескольких нанометров. Длина нанотрубок может достигать нескольких микрометров. Многослойные образования могут также иметь округлую форму (онионы), в сечении напоминающую луковицу.

3.3. Исследование свойств, размерных эффектов и примеры применения наноструктурных материалов



Исследования показывают, что формирование нанокристаллических структур позволяет получать конструкционные наноматериалы с уникально высокими свойствами. Их микротвердость, например, в 2–7 раз выше, чем твердость крупнозернистых аналогов, причем это не зависит от методов получения наноматериалов. Прочность этих материалов при растяжении в 1.5–2 раза превышает прочность крупнозернистых аналогов.

У крупных зерен рост прочности и твердости при уменьшении их размера обусловлен введением дополнительных границ зерен, которые тормозят движение дислокаций. При нанозернах рост прочности происходит благодаря низкой плотности имеющих дислокаций и трудности образования новых.

У керамических нанокристаллических материалов обнаружена повышенная пластичность при низких температурах, их можно использовать в промышленных процессах экструзии и прокатки. С уменьшением размеров зерна у всех наноматериалов увеличивается теплоемкость, но наибольший ее прирост наблюдается у материалов, полученных прессованием из нанопорошков. Уменьшение размеров зерен способствует повышению коэффициента

объемного термического расширения. Коэффициент граничной диффузии наноматериалов значительно выше, чем крупнозернистых, что позволяет легировать их нерастворимыми или слабо-растворимыми при обычных условиях элементами благодаря более развитой зеренной структуре.

Известно, что электросопротивление металлических твердых тел определяется в основном рассеянием электронов на фононах (квазичастицах, представляющих собой квант упругих колебаний среды), дефектах структуры и примесях. Значительное повышение удельного электросопротивления ρ с уменьшением размера зерна отмечено для многих металлоподобных наноматериалов (Cu, Pd, Fe, Ni, Ni-P, Fe-Cu-Si-B, Ni, Al, нитридов, боридов переходных металлов и др.). На рис. 3.10, *а* представлены температурные зависимости наноструктурных образцов никеля, полученных импульсным электроосаждением (толщина образцов 30...150 мкм).

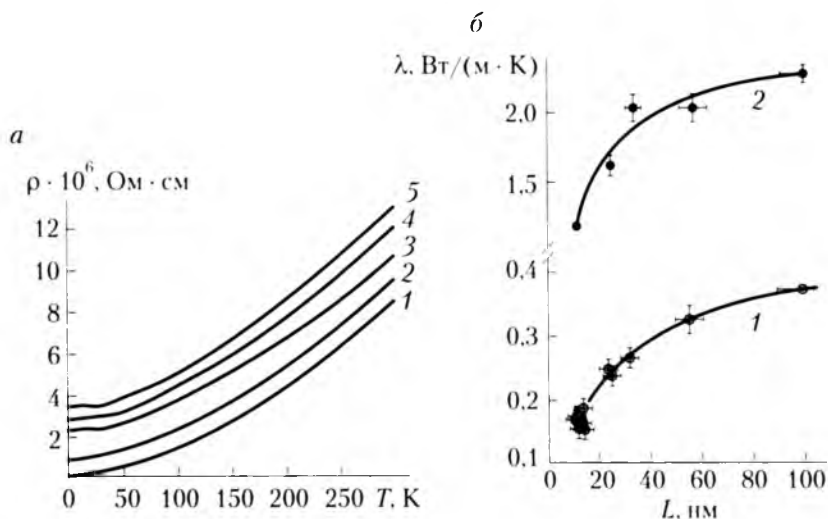


Рис. 3.10. Влияние размеров кристаллитов L наноструктурных материалов:

а — на электросопротивление образцов никеля с кристаллитами размером L 3 · 10⁵ (1), 55 (2), 30 (3), 27 (4), 22 (5) нм; *б* — на теплопроводность покрытия ZrO₂-Y₂O₃ (8...15 %) при пористости образцов около 10 % и температурах 25 К (1) и 480 К (2)

При этом электросопротивление заметно увеличивается с уменьшением размера зерна по изложенным выше причинам.

Изменение теплопроводности λ нанокристаллических покрытий толщиной 0,5...1,2 мкм из иттрийстабилизированного (8...15 % Y_2O_3) диоксида циркония ZrO_2 в зависимости от размеров кристаллитов при температурах 25 и 480 К показано на рис. 3.10, б. С уменьшением размеров L от 100 до 10 нм снижается теплопроводность покрытия в 2 и 2,5 раза соответственно.

Графики на рис. 3.11, а показывают влияние размера зерен на твердость по Виккерсу HV и прочность σ образцов железа, полученных методом горячего прессования интенсивно измельченных порошков.

Если твердость закономерно увеличивается с уменьшением размера зерна, то прочность при этом существенно снижается. Электромикроскопическим исследованием обнаружено наличие в структуре несплошностей и пор с разрывами (надрезами) (рис. 3.11, б), которые провоцировали зарождение трещин, что стало причиной снижения прочности материала.

Из табл. 3.2 следует, что преимущества в механических и эксплуатационных характеристиках нанокристаллического никеля по сравнению с обычным никелем очевидны. Обращает на себя внимание пластичность. Если у ленты из электроосажденного никеля с размером зерна $L = 100$ нм относительное удлинение $\delta \leq 15$ %,

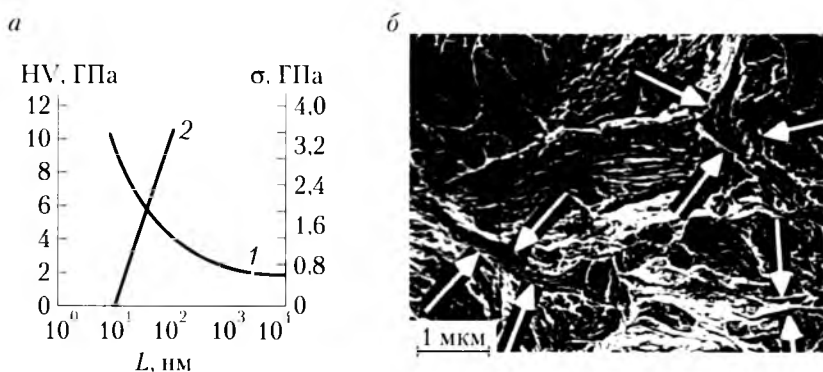


Рис. 3.11. Влияние размеров зерен на механические свойства железного компакта (а): 1 — твердость; 2 — прочность; микрофотография компакта с указанием стрелками пор и разрывов (б)

то при размере зерна 10 нм величина δ снижается до 1 %, что подтверждает существующее в материаловедении положение о снижении пластичности материала при повышении ее твердости и прочности. Кроме того, пластичность снижается при уменьшении размеров зерен из-за потери устойчивости дислокаций, а при $L < 10$ нм — практически их полного отсутствия. Снижение пластичности лент из электроосажденного нанокристаллического никеля с размером зерен $L \approx 100$ нм по сравнению с обычным крупнокристаллическим никелем объясняется наличием пор в наноматериале.

Таблица 3.2

**Механические и эксплуатационные свойства обычной
и наноструктурной никелевых лент при комнатной температуре**

Характеристика	Крупнокристаллический образец	$L = 100$ нм	$L = 10$ нм
Предел текучести, МПа	103	690	Более 900
Предел прочности, МПа	403	1100	Более 2000
Относительное удлинение, %	50	Более 15	1
Твердость по Виккерсу, ГПа	1.4	3.0	6.5
Усталостная прочность за 10^8 циклов на воздухе, МПа	241	275	—
Объемный износ в сухом воздухе, мкм^2	1330	—	7.9
Коэффициент трения в сухом воздухе	0.9	—	0.5

Следует отметить коррозионную стойкость электроосажденного наноструктурного никеля, которая оказалась вполне удовлетворительной даже при таких жестких технологических испытаниях, как коррозия под напряжением при температуре 350 °С в 10%-ном растворе NaOH в течение 3 ч. Уместно сказать, что в описанных условиях традиционные никелевые сплавы оказываются вообще неконкурентоспособными. Более того, в силу особенностей структуры наноматериалы лишены проявления локализованной коррозии, поскольку в целом средняя локализация вредных примесей на многочисленных границах зерен и их тройных стыков оказывается гораздо ниже, чем в обычных материалах.

Описанная наноструктурная никелевая лента, получаемая методом импульсного электроосаждения, благодаря высоким своим

механическим и эксплуатационным свойствам широко применяется для плакирования поверхностей деталей парогенераторной аппаратуры атомных станций, изделий добывающих и военных отраслей, а также может эффективно использоваться для восстановления и улучшения эксплуатационных свойств изношенных деталей машин.

Все больше внимания производителей привлекают наноструктурные твердые сплавы на основе карбидов вольфрама и титана с металлами-связками кобальтом и железом, которые по прочности, ударной вязкости, износостойкости и т.д. значительно превосходят аналогичные материалы с обычной структурой. Превосходные эксплуатационные характеристики наноструктурных твердых сплавов, например группы ВК ($WC + Co$), объясняются тем, что частицы разных фаз (карбида вольфрама и кобальта) формируют тройные стыки (контакты), в результате чего образуется структура, которую топологи называют «непрерывной в двух направлениях».

Обычно материалы типа ВК получают механическим перемешиванием соответствующих порошков с последующим прессованием и спеканием. Сложность механического перемешивания значительно возрастает при мелкодисперсных порошках WC и Co . Степень однородности смеси порошков при этом не позволяет получать в конечном спеченном продукте зерна размерами меньше 300 нм, и только разработанные в последнее время Б.Х. Киром новые химические методы обеспечивают предварительное наноразмерное перемешивание.

В качестве примера новых методов можно привести уже внедренный в промышленное производство процесс, при котором однородный порошок-полуфабрикат изготавливается методом сушки при распылении смеси растворов солей вольфрама и кобальта, а затем подвергается термохимической переработке. На рис. 3.12 показаны микросверла из нанокompозита (а) и обычного твердого сплава (б) после эксплуатации в одинаковых условиях и в одинаковое время на фирме Nanodyne Inc. Микросверло из обычного твердого сплава ВК потребовало неоднократных перезаточек и практически полностью износилось, а сверло из наноструктурного твердого сплава ВК за этот же период эксплуатации не потеряло своих режущих свойств и практически не износилось, превысив во много раз стойкость сверла из обычного сплава.



Рис. 3.12. Микросверла из твердосплавного нанокompозита (а) и обычного твердого сплава группы ВК (б) после одинаковых времени и условий эксплуатации

Учеными США и Австралии создана прозрачная ткань длиной 1 м и шириной 5 см из углеродных нанотрубок, прочность которых по соотношению прочность/масса материала выше, чем у закаленной стали. Известно, что нанотрубки способны проводить электричество. По мнению Р. Бохмана из Техасского университета, созданную наноткань ожидает масса применений: стройматериалы, оборудование, бронежилеты и т.д.

Наноткань является композитом, состоящим из переплетенного «леса» многослойных углеродных нанотрубок длиной 245 мкм и диаметром 10 нм. Образец таких спутанных нанотрубок длиной всего в 1 см может «развернуться» в трехметровую ленту толщиной 18 мкм при скорости «разворачивания» до 1 м/мин.

В результате первого цикла процесса получения наноткани образуется анизотропный (различные свойства в различных направлениях) аэрогель на основе нанотрубок с плотностью 0,0015 г/см³. Затем пленка из нанотрубок помещается в раствор этанола (этилового спирта). После вытаскивания ее из раствора испарение этанола вызывает сокращение толщины пленки до 50 нм в результате эффектов поверхностного натяжения, а плотность ткани возрастает до 0,5 г/см³. Полученная усиленная пленка прозрачна и электропроводна, удельная прочность ее составляет 160 МПа. Для сравнения прочность пленок майлар и каптон, используемых в авиастроении, составляет 140 МПа, а прочность закаленной стали — 125 МПа. Рис. 3.13, а иллюстрирует прозрачность новой наноткани, лента которой помещена в натяжном устройстве, а под ней расположена

а



б



Рис. 3.13. Наноткань из нанотрубок в натяжном устройстве, под ней расположена эмблема, видимость которой через ткань свидетельствует о прозрачности последней (а); пластины-имплантанты из нанобиотитана (б)

эмблема фирмы со звездой. Указанные выше преимущества нового наноматериала сулят ему большое будущее в применении.

Наноструктурные материалы используются во всех областях, включая машиностроение, ремонтно-восстановительное производство, медицину, биологию, сельское хозяйство и т.д. Для примера рис. 3.13, б иллюстрирует наноструктурные титановые пластины, полностью биологически совместимые с живой тканью и используемые в качестве протезов при восстановлении суставов, сращивании костей, фиксации позвоночника человека и т.п.

Нелегированный титан, обладая высокой биологической совместимостью, имеет невысокие механические свойства и ползучесть (меняет свою форму при небольших постоянно действующих нагрузках). Методы интенсивной пластической деформации позволяют измельчить зерна материала вплоть до 100 нм, что обеспечивает 2–3-кратное повышение механических свойств и полностью исключает проявление ползучести. Физико-механические характеристики наноструктурного материала при этом соответствуют легированному ванадию, алюминию и титановым сплавам, однако

последние значительно уступают нелегированному титану по биологической совместимости и поэтому не могут, как и другие металлы, использоваться в медицине.

Катализаторы краски, пористые среды, включая фильтры, химические источники энергии, сенсоры (чувствительные элементы) — это одни из наиболее характерных приложений наноструктурных материалов в химической промышленности, переработке нефтепродуктов, охране окружающей среды. Размер пор (окон) в обычных цеолитах (группах минералов, высокосодержавших алюмосиликаты Ca, Na и др.) изменяется, например, в интервале 0,4...1,5 нм и зависит от числа атомов кислорода в циклических структурах, образующих цеолит. Следует иметь в виду, что поверхности многих пористых наноструктур обладают каталитическими (возбуждающими, ускоряющими химические реакции) свойствами. С этой точки зрения пористые носители подразделяются на кислые (H⁺, водород, иттрий и др.), нейтральные (силикагель) и основные (оксиды Ti, Mg, Al и щелочные цеолиты).

Разработанные в США алюмосиликатные цеолиты MCM-41, размер цилиндрических пор в которых составляет 2...10 нм (см. рис. 3.8), широко используются при каталитической переработке нефти и нефтепродуктов, обеспечивая большой экономический эффект. Отмечаются высокие сорбирующие характеристики применительно к очистке отходящих газов от трудноразрушаемых канцерогенных диоксидов при использовании каталитических, сорбирующих и фильтрующих свойств нанотрубок.

Фотокаталитические свойства нанокристаллического диоксида титана TiO₂ нашли применение в приборах (устройствах) для очистки воздуха от органических загрязнений и промышленного, и бытового происхождения в различных помещениях: цехах и бытовых помещениях различных производств, квартирах, больницах, детских садах, офисах и т.д. Принцип работы устройств основан на фотокаталитическом окислении органических примесей на поверхности нанокристаллического TiO₂ под воздействием ультрафиолетового излучения (рис. 3.14).

Результаты очистки воздуха указанным очистителем от различных вредных химических соединений представлены в табл. 3.3.

В НПЦ «Ультрам» разработана гамма пластинчатых и трубчатых фильтрующих элементов из пористой нержавеющей стали

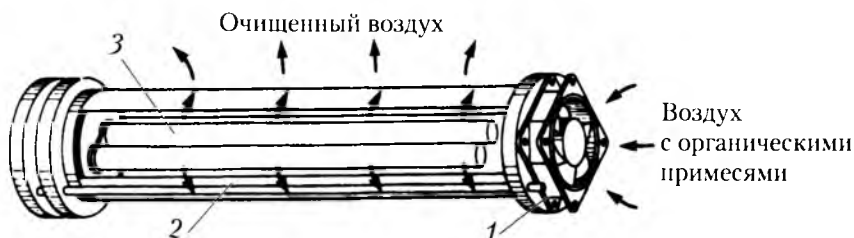


Рис. 3.14. Схема фотокаталитического очистителя воздуха:

1 — вентилятор; 2 — фотокаталитический элемент из наноструктурного диоксида титана (TiO_2); 3 — ультразвуковая лампа

со слоем ультрадисперсных порошков на основе TiO_2 и TiN . Тонкость фильтрации таких фильтров для газовых сред — до 10 нм, для жидких сред — до 10...100 нм. Разделение водно-масляных эмульсий (например, СОЖ), очистка сточных вод и жидких радиоактивных отходов, фильтрация продуктов распада клеток, осветление фруктовых соков — таков неполный перечень областей применения созданных фильтров тонкой очистки на базе наноматериалов.

Таблица 3.3

Изменение концентрации примесей в воздухе после фотоокислительной очистки (замкнутый объем 190 л, время 2 ч)

Соединение	Концентрация, мг/м ³		
	начальная	конечная	предельно допустимая
Ацетон	270	15	200
Гексан	600	85	—
Бензол	25	0,5	5
Хлороформ	600	15	—
Монооксид углерода	50	0,1	20
Толуол	500	15	50
Пиридин	5	0,01	5
Формальдегид	5	0,01	0,5
Дихлорэтан	50	0,5	10
Ксилол	300	15	50

Пористый бериллий считается перспективным для изготовления тритийвоспроизводящего blankets термоядерных реакторов. Изделия из бериллия пористостью 20...30 % играют роль отража-

теля и размножителя нейтронов. Для повышения прочности таких изделий и формирования микроячеистой структуры с полностью открытыми порами к обычному крупнокристаллическому порошку добавляется BeH_2 , разложение которого за счет образования наночастиц бериллия способствует укреплению контактов между частицами, а выделение водорода — образованию открытых пор.

Благодаря обилию поверхностей раздела как путей для выхода продуктов облучения, нанокристаллическая структура оказывается полезной и при создании малораспухаемых оболочных и топливных материалов для тепловыделяющих элементов высокопоточных быстрых и тепловых атомных реакторов.

3.4. Исследование нанотехнологий и создание средств их обеспечения



В технологии наноматериалов, в соответствии с описанным выше многообразием последних, характерно сочетание, с одной стороны, металлургических, физических, химических и биологических методов, а с другой — традиционных и принципиально новых приемов. Так, если подавляющее большинство методов получения консолидированных наноматериалов (см. табл. 3.1) достаточно традиционны, то такие процессы, как изготовление наноструктур с помощью сканирующего туннельного микроскопа, формирование квантовых точек самосборкой атомов, получение нанокомпозитов, основаны на принципиально иных технологических приемах.

Применительно к изготовлению нанопорошковых материалов в качестве исходного сырья используются ультрадисперсные порошки с размерами частиц и кристаллов не более 100 нм. Совокупность операций консолидации (прессование, спекание, горячее прессование и т.п.) призвана обеспечить получение изделий заданных форм, размеров и свойств с уплотнением (отсутствие макро- и микропор), сохранением наноструктуры ультрадисперсного порошка, т.е. обеспечение размеров зерен у спеченного материала в пределах до 100 нм.

Методы и способы получения нанопорошков подразделяются на физические и химические (табл. 3.4).

Таблица 3.4

**Основные методы и способы получения порошков
для изготовления наноматериалов**

Метод	Способ	Материалы
<i>Физические</i>		
Испарение и конденсация	В вакууме или инертном газе	Zn, Cu, Ni, Al, Be, Sn, Pb, Mg, Ag, Cr, MgO, Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , ZrO ₂ , SiC
	В реакционном газе	TiN, AlN, ZrN, NbN, ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , TiO ₂
Высокоэнергетическое разрушение	Измельчение	Fe–Cr, Be, Al ₂ O ₃ , TiC, Si ₃ N ₄ , NiAl, TiAl, AlN
	Детонационная обработка	Bn, SiC, TiC, Fe, алмаз
	Электрический взрыв	Al, Cd, Al ₂ O ₃ , TiO ₂
<i>Химические</i>		
Синтез	Плазмохимический	TiC, TiN, Ti(C,N), VN, AlN, SiC, BN, W, Si ₃ N ₄
	Лазерный	Si ₃ N ₄ , SiC, Si ₃ N ₄ –SiC
	Термический	Fe, Cu, Ni, Mo, W, BN, TiC, WC–Co
	Самораспространяющийся высокотемпературный	SiC, MoSi ₂ , AlN, TaC
	Механохимический	TiC, TiN, NiAl, TiB ₂ , Fe–Cu, W–Cu
	Электрохимический	WC, CeO ₂ , ZrO ₂ , WB ₄
	Растворный	Mo ₂ C, BN, TiB ₂ , SiC
	Криохимический	Ag, Pb, Mg, Cd
Термическое разложение	Конденсированные прекурсоры (исходные вещества)	Fe, Ni, Co, SiC, Si ₃ N ₄ , BN, AlN, ZrO ₂ , NbN
	Газообразные прекурсоры	TiB ₂ , ZrB ₂ , BN

Приведенное разделение методов можно считать условным, так как, например, физические методы и способы часто осуществляются с протеканием химических реакций. В то же время многие химические способы основаны на физических явлениях.

Химический метод более универсален и более производителен, но управление размерами, составом и формой частиц легче осуще-

ствляется и достигается физическими методами, особенно испарительно-конденсационным.

При испарительно-конденсационном методе, который известен давно и в теоретическом плане изучен в наибольшей степени, различаются гомогенное (однородное) и гетерогенное (неоднородное) зарождение кластеров (зародышей). Проводя испарение в нейтральных средах и вводя в пространство испарения посторонние поверхности, можно обеспечивать гетерогенное зародышеобразование, для чего необходимо большое насыщение и присутствие в конденсируемом паре молекул нейтрального газа.

Наночастицы могут быть изготовлены и путем кристаллизации из эмульсий. Во избежание агломерирования, что является основным недостатком «мокрых» методов синтеза, осаждение проводится в гетерогенных средах с использованием стабилизации ПАВ полимерного типа, с помощью которых получают, например, частицы диоксида циркония ZrO_2 размером менее 10 нм.

Первая установка для получения ультрадисперсных порошков была разработана в СССР в 1960 г. В установке капля расплавленного металла, висятая в индукционном поле, обдувается потоком высокочистого аргона, выносящего сконденсировавшиеся наночастицы в специальный порошок сборник, разгрузка которого осуществляется в контролируемой безокислительной атмосфере. Последующее хранение и технологические операции проводятся также в аргонной среде. Испарительно-конденсационный метод использован в установке Глейтера (рис. 3.15, *а*), в которой получение ультрадисперсного порошка в атмосфере разреженного инертного газа совмещено с прессованием. Конденсируемые на поверхности охлаждаемого вращающегося коллектора 4 (цилиндра) частицы снимаются скребком 5 и собираются в пресс-форме 2 предварительного прессования (давление до 1 ГПа), а затем в узле комплектования при высоком давлении (пресс-форме) 1 производится компактирование при более высоких давлениях (до 3...5 ГПа). Производительность этой установки лимитируется невысокими скоростями испарения.

На рис. 3.15, *б* представлена схема установки для производства ультрадисперсных порошков оксидов, нитридов, боридов, силицидов и других соединений методом конденсации с использованием в качестве исходных веществ (прекурсоров) металлоорганических

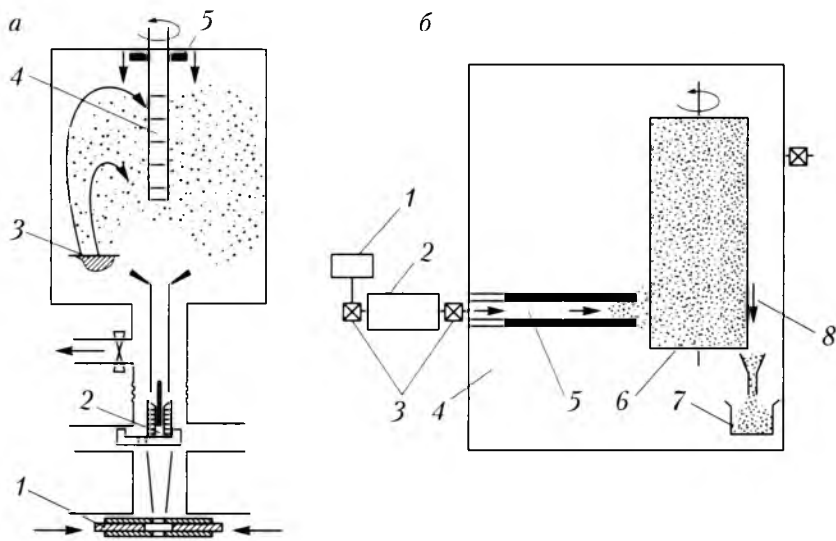


Рис. 3.15. Схемы установок:

а — Глейтера: 1 — узел комплектования при высоком давлении; 2 — узел предварительного прессования; 3 — испаритель; 4 — вращающийся коллектор, охлаждаемый жидким азотом; 5 — скребок; *б* — для получения ультрадисперсных порошков оксидов, нитридов, боридов и других соединений: 1 — подвод газа-носителя; 2 — источник прекурсора — исходного вещества; 3 — регулирующие клапаны; 4 — рабочая камера с давлением газа 1...50 Па; 5 — нагреваемый трубчатый реактор; 6 — охлаждаемый вращающийся цилиндр; 7 — коллектор; 8 — скребок

соединений. В этой установке низкопроизводительное испарение твердых компонентов заменено разложением термически малопрочных металлоорганических соединений типов тетраизопропилтитана или тетратетбутилциркония. В качестве испарителя здесь используется подогреваемый трубчатый реактор 5, в который подается газовая смесь прекурсора и нейтрального газа (носителя). Смесь выносится из испарителя в рабочую камеру 4 и конденсируется на вращающемся охлаждаемом цилиндре 6, откуда скребком 8 счищается в специальный коллектор 7. Производительность установки регламентируется требуемыми размерами частиц порошков и достигает 20 г/ч.

Высокоэнергетическое измельчение — это пример технологий типа «сверху вниз». Оно осуществляется в мельницах, дезинте-

граторах, атриторах и других устройствах за счет раздавливания, раскалывания, истирания, разрезания, распиливания, удара или в результате комбинаций этих воздействий на материалы.

Рисунок 3.16 иллюстрирует схему атритора, в котором за счет вращения измельчаемой шихты и шаров совмещаются ударные и истирающие воздействия, и схему вибромельницы, конструкция которой обеспечивает высокую скорость перемещения шаров и частоту их ударов. На эффективность измельчения оказывает влияние соотношение массы шаров и измельчаемой смеси, которое обычно поддерживается в интервале от 5:1 до 40:1.

В практике получения наноматериалов установки, представленные на рис. 3.16, часто используются для операций механохимического синтеза, когда высокоэнергетическое диспергирование сочетается с образованием сплавов и соединений в результате химических реакций. Последние протекают либо за счет взаимодействия исходных порошков, либо в результате насыщения их из газовой фазы, а также при различных смешанных вариантах.

Образование соединений и сплавов в условиях механохимического синтеза обусловлено как интенсивной генерацией новых

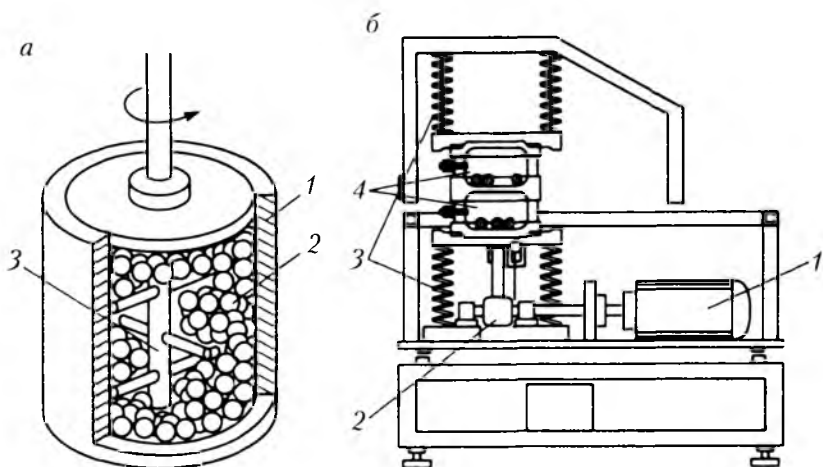


Рис. 3.16. Установки для измельчения материалов:

а — атритор: 1 — корпус; 2 — шары; 3 — вращающаяся крыльчатка; б — вибромельница: 1 — двигатель; 2 — вибратор; 3 — пружины; 4 — барабаны с шарами и измельчаемой шихтой

поверхностей и тщательным перемешиванием, что обеспечивает интенсификацию диффузионных процессов, так и разупрочнением кристаллических структур реагентов, что является одним из важных факторов осуществления процессов образования сплавов и соединений при более низких температурах, чем это необходимо для обычного синтеза. Способом механохимического синтеза получают ультрадисперсные порошки тугоплавких соединений (TiN , TiC , TiB_2 , ZnN , N в C и многих других); композиционные составы типа $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}$ (Ni , Cr), пересыщенные твердые растворы в системах $\text{Fe}-\text{Cu}$, $\text{Fe}-\text{Ni}$, $\text{Fe}-\text{Ti}$, $\text{Fe}-\text{Al}$, $\text{W}-\text{Cu}$, $\text{Ni}-\text{Al}$ и др.

Высокоэнергетическое измельчение и механохимический синтез обеспечивают получение ультрадисперсных порошков различного состава в нужных масштабах, но при этом ограничен минимальный размер частиц (кристаллитов) и не всегда бывает высокая чистота (незагрязненность) получаемых составов.

Плазмохимический синтез в низкотемпературной плазме осуществляется при температурах 6000...8000 К, что обеспечивает высокий уровень пересыщения, большие скорости реакций и конденсационных процессов. Используются как дуговые плазмотроны, так и высоко- и сверхвысокочастотные (СВЧ) генераторы плазмы. Дуговые аппараты более производительны и доступны, однако СВЧ установки (рис. 3.17) обеспечивают получение более мелких и чистых порошков.

В качестве исходных продуктов для плазмохимического синтеза используются хлориды металлов, металлические порошки, кремний- и металлоорганические соединения.

Плазмохимическая технология обеспечивает получение мелкодисперсных порошков тугоплавких металлов (N , Mo), соединений (TiN , AlN , Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , Ti (C , N) и др.), а также композиционных объектов типа $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiC}$, $\text{TiB}_2 + \text{TiN}$ и др.

Метод синтеза в условиях ультразвукового воздействия известен как сонохимический синтез, в основе которого лежит эффект кавитации (образования микроскопических пузырьков). При кавитации в малых объемах развивается давление до 50...100 МПа и температура до 3000 К и выше при огромных скоростях нагрева и охлаждения. В описанных условиях пузырек становится как бы нанореактором. При использовании экстремальных условий внутри кавитационных пузырьков получены наночастицы многих металлов,

сплавов и тугоплавких соединений (Fe, Ni, Co, их сплавы, коллоиды золота и меди, нанооксид циркония и др.).

Электровзрыв тонких проволочек известен давно. Он происходит при пропускании через проволочку импульсов тока плотностью $10^4 \dots 10^6$ А/мм² с ее испарением и конденсацией паров в виде частиц

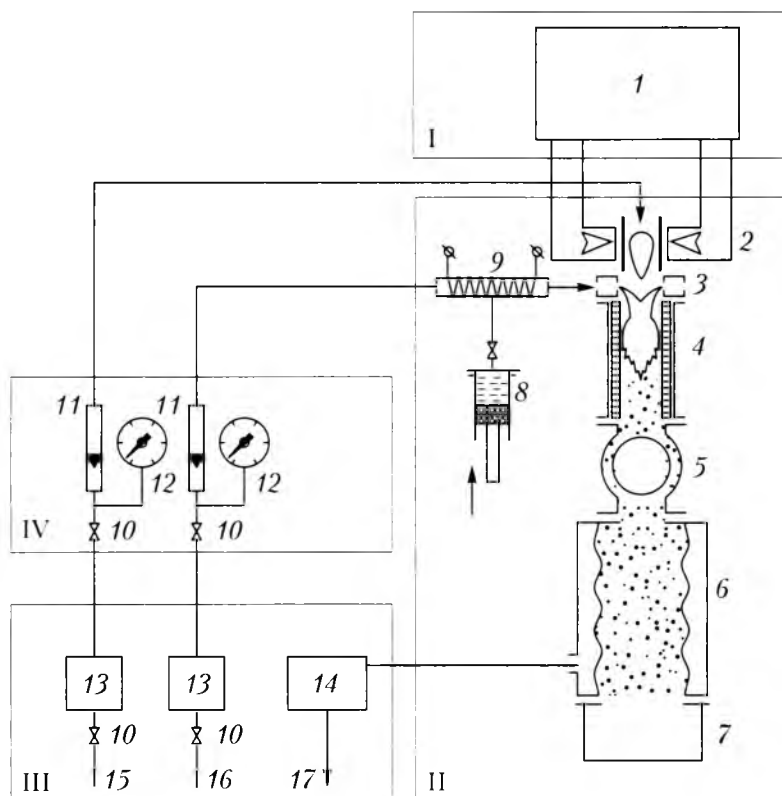


Рис. 3.17. Схема СВЧ установки плазмохимического синтеза:

I – силовое оборудование: 1 – микроволновый генератор; II – основное технологическое оборудование: 2 – плазмотрон; 3 – устройство ввода реагентов; 4 – реактор; 5 – теплообменник; 6 – фильтр; 7 – сборник порошка; 8 – дозатор реагентов; 9 – испаритель; III и IV – соответственно вспомогательное технологическое оборудование и блок управления: 10 – вентили; 11 – ротаметры; 12 – манометры; 13 – система очистки газов; 14 – скруббер (улавливатель примесей); 15 – ввод плазмообразующего газа; 16 – ввод газоносителя; 17 – вывод газов

различной дисперсности. В зависимости от окружающей среды может происходить образование металлических частиц (инертные среды), оксидных или нитридных порошков (окислительные или азотные среды). Требуемый размер частиц и производительность процесса регулируются параметрами разрядного контура и диаметром используемой проволоки. Форма наночастиц преимущественно сферическая. Для наночастиц размером 50...100 нм таких металлов, как Al, Cu, Fe и Ni, производительность установок для реализации описанной технологии составляет 50...200 г/ч при энергозатратах 25...50 кВт · ч/кг.

Нанопорошки оксидов (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , MgAl_2O_4 и др.) также могут быть изготовлены по этой технологии, и после седиментационной обработки (осаждение из взвешенного состояния) может быть достигнут размер частиц 20...30 нм.

Рассмотренные методы и способы получения нанопорошков свидетельствуют об усложнении процессов и оборудования их производства.

Следует остановиться на методах и способах консолидации нанопорошковых материалов (см. табл. 3.1). Все известные в порошковой металлургии методы (прессование и спекание, варианты горячего прессования, горячее экструдирование и др.) применимы и к ультрадисперсным порошкам. В установке типа изображенной на рис. 3.15, а, несмотря на использование довольно высоких давлений прессования (до 2...5 ГПа), в вакуумных условиях и при небольшой высоте образцов (до 1 мм) удастся получить материал пористостью не менее 10...15 %.

Для ультрадисперсных порошков характерна низкая уплотняемость при прессовании в силу значительного влияния характеристик трения между частицами. В технологии прессования нанопорошков при комнатной температуре эффективно применение ультразвуковых колебаний, которые уменьшают упругое последствие после снятия нагрузки и повышают плотность материала изделия за счет уменьшения пористости.

Обычное спекание для спрессованных нанопорошков неприемлемо, поскольку с уменьшением пористости наблюдается рост зерна и исчезновение наноструктуры. Более приемлемо спекание под давлением. Так, спекание под давлениями 7,7 и 4 ГПа образцов из ультрадисперсного порошка TiN (начальный средний размер

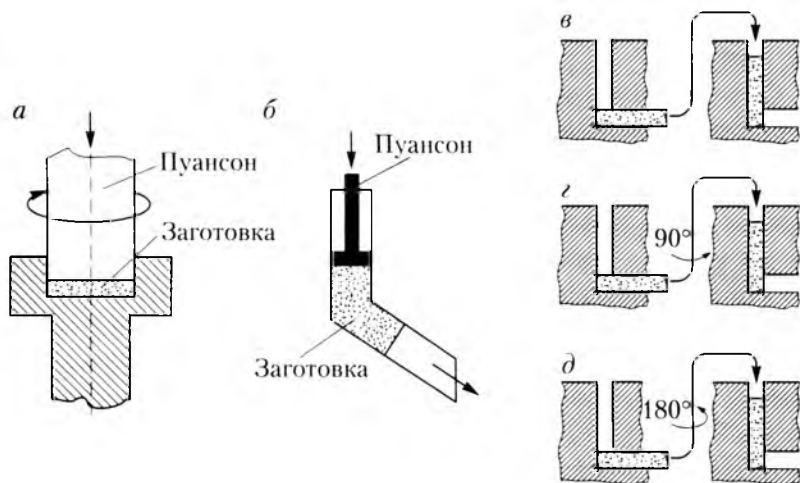


Рис. 3.18. Схемы интенсивной пластической деформации:

а — кручение под высоким давлением; *б* — равноканальное разовое угловое прессование; *в* — повторное с неизменной круговой ориентацией; *г* — повторное с осевым поворотом заготовки на 90° ; *д* — повторное с осевым поворотом заготовки на 180°

частиц около 60 нм) обеспечивает пористость соответственно 3 и 5 % при сохранении исходной наноструктуры, что приемлемо для наноматериалов с такой допустимой пористостью.

Для исключения рекристаллизационных явлений при спекании спрессованных нанопорошковых материалов используется электро-разрядный нагрев, осуществляемый путем пропускания тока через спекаемый образец, и горячая обработка давлением порошковых объектов (ковка, прокатка, экструзия). При этом размер кристаллитов остается на уровне наноструктур, но на пределе, т.е. не ниже 50...100 нм.

Одним из путей консолидации наноматериалов является интенсивная пластическая деформация (ИПД) (рис. 3.18).

В случае схемы, представленной на рис. 3.18, *а*, дискообразная заготовка в матрице сжимается вращающимся пуансоном. Квази-гидростатическая деформация при высоком давлении и деформации сдвигом приводит к наноструктурам с увеличенными угловыми межзеренными границами. В случае схемы, изображенной на рис. 3.18, *б*, образец деформируется по принципу простого сдвига,

при этом имеется возможность повторного деформирования (см. рис. 3.18, *в–д*).

Степень деформации по схеме рис. 3.18, *а* регулируется числом оборотов. При выполнении деформирования по схемам рис. 3.18, *а* и *б* размер зерен порошкового наноматериала практически сохраняется. Достоинство ИПД состоит в обеспечении возможности получения беспористых порошковых материалов, при этом последние могут быть реализованы в больших по размерам заготовках при использовании повторных процедур прессования.

Приведенная схема ИПД доступна для прессования металлических нанопорошков. Металлические многослойные нанокомпозиты Cu–Nb и Cu–Ag, например, при многоступенчатой обработке давлением (холодное волочение с экструзией, горячая прокатка или экструзия с последующими операциями холодной прокатки, ИПД кручением и равноканальным угловым прессованием с повторением процедур и др.). Толщина волокон и слоев в нанокомпозитах, например Cu–Nb, может составлять от 10 до 100 нм.

Технологии пленок и покрытий универсальны в отношении состава наноматериалов, которые могут быть изготовлены в беспористом состоянии в широком диапазоне размеров зерен, начиная от 1...2 нм и более. В табл. 3.5 приведены основные методы и способы получения наноструктурных пленок (покрытий) на основе тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, боридов).

Таблица 3.5

**Основные методы получения наноструктурных пленок (покрытий)
на основе тугоплавких соединений**

Метод	Способы	Соединения
<i>Физические</i>		
Термическое испарение	Активированное реактивное испарение	Нитриды и карбиды
	Электронно-лучевой нагрев	Бориды и карбиды
	Лазерная обработка	Нитриды и карбиды
Ионное осаждение	Ионно-дуговое распыление	Нитриды и карбиды
	Магнетронное распыление	Нитриды, карбиды, бориды
	Ионно-лучевая обработка; имплантация	Нитриды и бориды

Окончание табл. 3.5

Метод	Способы	Соединения
<i>Химические</i>		
Осаждение из газовой фазы	Плазмосопровожаемые и плазмоактивируемые CVD-процессы; электронный циклотронный резонанс	Нитриды, карбиды, бориды
Термическое разложение	Газообразные и конденсированные прекурсоры	Нитриды и бориды

Возбуждение дугового разряда или углеродосодержащей атмосферы — один из распространенных вариантов технологий ионного осаждения; в качестве источников ионов металлов используются металлические катоды. Электродуговое испарение высокопроизводительно, но имеет место металлическая капельная фаза, которая требует специальных конструктивных мер. Этого недостатка лишен магнетронный вариант ионно-плазменного осаждения, когда мишень-катод распыляется за счет бомбардировки ионами плазмы газового разряда низкого давления, которое формируется между катодом и анодом. При этом поперечное постоянное магнитное поле локализует плазму у распыляемой поверхности мишени и повышает эффективность распыления.

При ионно-лучевой обработке выбивание атомов мишени обеспечивается за счет бомбардировки ее поверхности ионными пучками. Применительно к ряду металлов и сплавов (Ni, Cu, Ni–P, Ni–Mo, Ni–W и др.) для получения наноструктур весьма эффективным оказался метод импульсного электроосаждения, когда реализуется высокая скорость зарождения кристаллитов и за счет ингибирующих процессов обеспечивается их низкая скорость роста по размеру.

Все большее распространение получает метод газотермического напыления наноструктурных покрытий. В качестве исходных материалов при этом используются оксидные и карбидные композиционные нанопорошки. Схема установки газотермического напыления твердосплавных порошков с использованием кислород-углеводородных газовых смесей показана на рис. 3.19. Перед напылением исходные порошки обрабатываются в высокоэнергетических измельчающих агрегатах (см. рис. 3.16), а затем для улуч-

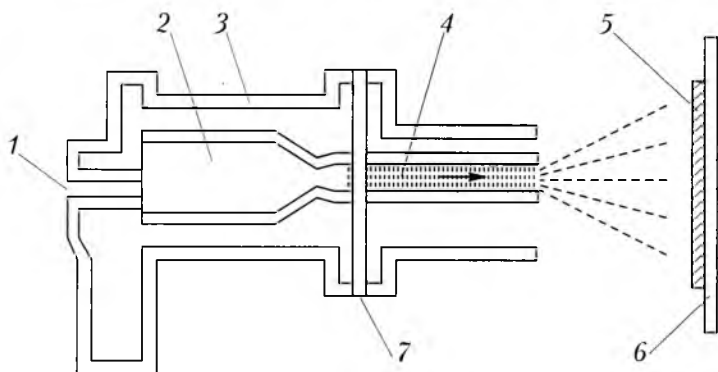


Рис. 3.19. Схема установки газотермического напыления:

1 — ввод газовых смесей; 2 — смеситель; 3 — система охлаждения; 4 — плазменный ствол; 5 — покрытие; 6 — подложка; 7 — ввод порошка

шения сыпучести подвергаются агломерации (смешиванию с пластификатором и обкатке). В результате получают округлые частицы размерами 10...50 мкм.

Именно эта операция обеспечивает достаточную скорость поступления агломерированных сфероидов (окатышей) в плазменную струю с температурой около 3000 К. Но высокие скорости газового потока (порядка 2000 м/с) обеспечивают кратковременность пребывания наноструктурных частиц в высокотемпературной среде. Показатели твердости и износостойкости описанных покрытий превосходят таковые для покрытий обычными материалами в 1,3–2 раза. Ионно-плазменное нанесение покрытий, включая имплантацию, используется применительно к металлам, сплавам, полупроводникам, полимерам и др. для создания поверхностных сегрегаций и нанорельефа, что актуально для практического использования в машино- и приборостроительных, ремонтно-восстановительных производствах.

Технология производства (разработана в США) нанопористого материала МСМ-41 предусматривает получение его из раствора, содержащего силикаты натрия и алюминия с поверхностно-активными добавками. Раствор обрабатывается в автоклаве при температуре 150 °С в течение 48 ч с последующей промывкой, сушкой и обработкой при температуре 540 °С в азотной и воздушной среде. Технология предусматривает также создание жидкокристаллического

темилата, формирующего гексагонально расположенные каналы, внутри которых находятся мицеллы (тетраалкиломоновые соединения), удаляемые при нагреве, а силикат заполняет пространство вокруг каналов (рис. 3.20, *a*).

Применительно к нанокompозитным молекулярным ситам цеолитного вида различается два типа получения таких матричных структур: кристаллизация пористого материала из геля, где имеются наночастицы будущего композита, и синтез наночастиц прекурсоров, предварительно введенных в цеолиты.

Схема установки для получения углеродных нанотроек показана на рис. 3.20. Графитовый электрод 2 расплывается в гелиевой плазме дугового разряда; продукты расплывления в виде трубок,

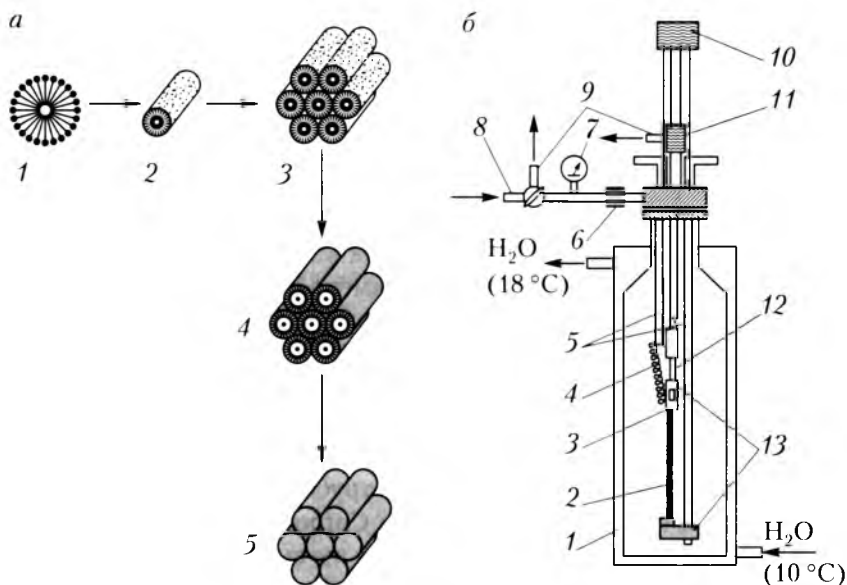


Рис. 3.20. Схемы:

a — получения нанопористого материала МСМ-41: 1 — поверхностно-активная мицелла; 2 — мицеллярный стержень; 3 — гексагональная сборка; 4 — гексагональная силикатная сборка; 5 — МСМ-41 после обжига; *б* — установки для получения фуллеренов и углеродных нанотроек: 1 — охлаждаемый реактор; 2 — графитовый анод; 3 — графитовый катод; 4 — медный жгут; 5 — токовводы; 6 — фильтр; 7 — вакуумметр; 8, 9, 11 — вакуумные и газовые подводы; 10 — электродвигатель; 12 — изолятор; 13 — держатели

фуллеренов, копоти и т.п. осаждаются на поверхности катода 3, а также на боковых стенках охлаждаемого реактора 1. Наибольший выход трубок наблюдается при давлении 500...600 кПа. После синтеза концы трубок обычно закрыты шапочками (см. рис. 3.1, в). Важным элементом технологии нанотрубок является очистка и раскрытие их концов, что достигается различными методами: окислением, обработкой кислотами, обработкой ультразвуком и т.д.

Для получения нанотрубок может использоваться также лазерное распыление графита и пиролиз (разложение) углеводородов с участием катализаторов (металлы группы железа и др.). Последний метод является весьма перспективным в плане производительности и расширения структурного разнообразия нанотрубок.

Заполнение внутренних полостей нанотрубок может осуществляться как в процессе синтеза, когда добавки вводятся в графитовый электрод, так и после очистки, и тогда заполнение полостей обеспечивается «направленным» действием из расплавов, растворов, из газовой фазы и др.

Свойствами сворачиваемости обладает не только графит, но и нитриды, карбиды бора, оксиды, халькогениды (соединения меди), галогениды (соединения галогенов с другими элементами, например фториды, хлориды, бромиды, иодиды), различные тройные соединения, а также металлы, например Au. Самоформирующиеся трехмерные самоструктуры типа нанотрубок можно получать на основе полупроводников и других веществ в результате самосворачивания тонких слоев в трубки — свитки, в результате действия в эпитаксиальных слоях остаточных растягивающих или сжимающих напряжений.

Производство фуллеренов и нанотрубок стремительно растет. Так, японская фирма Frontier Carbon Corporation имеет динамику производства фуллеренов C_{60} и C_{70} и их смеси: начало XX в. — 40 т, 2005 г. — 300 т, 2007 г. — 1500 т. Такая динамика присуща другим странам.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение понятий «наноматериал» и «нанотехнология».
2. Охарактеризуйте основные разновидности наноматериалов.
3. Какова структура наноматериалов?
4. Дайте характеристику методам и средствам электронной микроскопии.

5. Могут ли нанокристаллы быть бездефектными?
6. Дайте характеристику тубулярным наноструктурам.
7. Каково влияние размерных эффектов на структуру и свойства наноматериалов?
8. Как меняется прочность, твердость и пластичность с уменьшением размеров зерен в наноматериалах?
9. Охарактеризуйте влияние размера кристаллитов на электрические, тепловые и другие свойства наноматериалов.
10. Приведите примеры улучшения эксплуатационных свойств наноматериалов по сравнению с обычными материалами.
11. Охарактеризуйте основные направления использования наноматериалов в машиностроении и ремонтно-восстановительном производстве.
12. Приведите примеры эффективного использования наноматериалов в различных областях народного хозяйства.
13. Охарактеризуйте перспективы расширения использования наноматериалов.
14. Каковы проблемы создания наноматериалов и композитов на их основе?
15. В чем состоят трудности использования порошковых консолидированных материалов?
16. Приведите классификацию консолидированных материалов по методам изготовления и типам структуры.
17. Перечислите методы и средства изготовления нанопорошков.
18. Охарактеризуйте получение наноматериалов методами интенсивной пластической деформации.
19. Опишите технологию получения углеродистых наноструктур.
20. В чем состоят особенности технологий консолидации наноматериалов?
21. Каковы особенности технологии получения пористых и супермолекулярных наноматериалов?



ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПОДГОТОВКИ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ И ОТЧЕТНОСТЬ ПО НИРС

4.1. Организация научно-исследовательской подготовки студентов во вузах



Необходимость обеспечения научно-исследовательской подготовки студентов в технических вузах очевидна. Этот процесс можно начинать с чтения в третьем семестре теоретического курса «Основы научных исследований» (гл. 1) и выполнения лабораторного практикума, желательно в виде одной комплексной лабораторной работы исследовательского характера с полноценным отчетом.

Тематика лабораторных работ может быть подобрана из гл. 2 настоящего пособия, по литературным источникам или по направлению научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) профилирующей кафедры.

Организационные вопросы, документооборот, отчетность по научно-исследовательской деятельности студентов на весь период с третьего курса до окончания вуза рассмотрен в настоящей главе.

Необходимо, чтобы уже с первого курса студент приобщался к исследовательской деятельности на общетехнических кафедрах при изучении курсов: «Детали машин», «Соппротивление материалов», «Теория машин и механизмов», «Электротехника», «Теплотехника», «Материаловедение», «Метрология и технические измерения»,

«Техническая механика» и др. Хорошим резервом в становлении начинающих исследователей является изучение состояния каких-либо областей естествознания и составления научных обзоров по ним.

Важным средством подготовки к исследованиям может быть участие в дискуссиях и выступления с сообщениями на различных семинарах и конференциях. Умение выступать, отстаивать и доказывать свою позицию, описывать события и результаты исследований является необходимым качеством будущего экспериментатора и исследователя.

Обеспечение подготовки студентов к НИОКР должно прослеживаться на всех практиках, в заданиях на которые необходимо отражать вопросы исследовательского содержания. В курсовых и дипломных проектах всегда должно быть предусмотрено исследование обзорного характера. Лучше, если наиболее подготовленные студенты будут выполнять проекты по направлениям своих исследований. Участие в научно-исследовательских кружках, в кружках по интересам своей специальности по линии студенческого научно-технического общества и в других общественных структурах также способствует расширению кругозора и привитию духа творчества молодым людям. Другими словами, весь учебный процесс во вузе должен быть пронизан духом научно-технического творчества и поиска прогрессивных решений.

Ниже изложен опыт одного из подразделений Киевского политехнического института, а ныне Украинского национального технического университета по организации учебно-исследовательской работы студентов [10].

Учебно-исследовательская работа студентов является одним из элементов и продолжением курса «Основы научных исследований». Ее задачей является привитие навыков исследований по различным направлениям науки и техники.

Исследовательская работа выполняется студентами под руководством научных руководителей-преподавателей кафедры по индивидуальному заданию (рис. 4.1).

Закрепление студентов за преподавателями для выполнения учебной научно-исследовательской работы одновременно является, в основном, и закреплением на дипломное проектирование. Это

Министерство вуз Кафедра ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ на научно-исследовательскую работу студенту группы _____	
_____ (фамилия, имя и отчество студента)	
1. Тема исследовательской работы _____ Утверждено кафедрой « ____ » _____ 20 ____ г. Протокол № _____ 2. Рекомендуемые материалы и литература _____ 3. Вид отчетности _____ 4. Заключение научного руководителя темы _____ Научный руководитель _____ / _____ (подпись) (фамилия и.о.) Дата _____	

Рис. 4.1. Примерная форма задания по УИРС

позволяет студентам заблаговременно готовиться к выполнению научно-исследовательской части дипломного проекта.

При выполнении учебно-исследовательской работы студентов соблюдается следующий порядок.

1. Тематика исследовательских работ подбирается и формируется научным руководителем в соответствии с его научным направлением.

По характеру выполняемых работ исследования в учебном процессе можно разбить на группы:

- ☐ теоретические исследования в области общественных, экономических и технических наук;
- ☐ поиск и реферирование;
- ☐ экспериментальные работы;
- ☐ разработка, монтаж и наладка новых лабораторных установок и стендов с последующим определением их метрологических свойств, динамических характеристик и т.п.;

□ проектные работы исследовательского и опытно-поискового характера;

□ комплексные темы.

2. Посещаемость студентов и выполняемая работа фиксируется в таблице, который постоянно находится у научного руководителя, а также в индивидуальном задании по окончании работы и в учетной карточке работы студентов (рис. 4.2) в конце каждого семестра.

В период учебного семестра студент обязан доложить на научном семинаре кафедры о проделанной научно-исследовательской

УЧЕТНАЯ КАРТОЧКА	
студента (бригады студентов) по учебно-исследовательской работе	
Фамилия (фамилии), и.о. студента	_____
Группа	_____
Научный руководитель	_____
Ученая степень и звание	_____
Фамилия, и.о.	_____
Тема исследовательской работы:	_____

Отметки о проделанной работе (участие в семинарах на кафедре, выступления на конференциях, объем выполненной работы и т.д.) и отзывы научного руководителя о проделанной работе студента (бригады):	
7-й семестр	_____
8-й семестр	_____
9-й семестр	_____
Рекомендация научного руководителя по оценке деятельности студентов по учебно-исследовательской работе _____	

Экзамен, зачет с оценкой по курсу «Основы научных исследований», учебно-исследовательской работе студента _____	
Решение кафедры № _____ от « _____ » _____ 20 ____ г.	
Научный руководитель _____	
(подпись)	

Рис. 4.2. Форма учетной карточки студента

работе и полученных данных. Об уровне достижений студента и результатах доклада делается соответствующая запись в учетной карточке студента.

После выступления студента на семинаре по предоставлению научного руководителя кафедра выносит решение о рекомендации материалов для доклада на научных студенческих конференциях, оформлении статей, представлении на конкурсы, использовании в курсовых и дипломных проектах.

3. В 9-м семестре, в период завершения теоретического курса обучения в институте каждый студент (или группа студентов, работавшая над одной комплексной темой) представляет отчет следующего содержания:

- ☐ задание;
- ☐ краткое изложение состояния исследуемого вопроса по литературным источникам с задачами исследования;
- ☐ описание методики исследования;
- ☐ результаты экспериментов с поясняющими графиками, рисунками, фотографиями;
- ☐ анализ результатов исследования;
- ☐ выводы по работе;
- ☐ список использованной литературы.

4. По результатам проверки отчета руководителем, выступлений на семинаре кафедры и на студенческих научно-технических конференциях студенту в конце 9-го учебного семестра может быть выставлен дифференцированный зачет.

5. Оформленный и подписанный научно-технический отчет и индивидуальное задание с заключением вместе с учетной карточкой и отзывом научного руководителя передается для хранения на профилирующую кафедру.

6. Студенты, которым не зачтен курс «Основы научных исследований» и учебно-исследовательская работа студента по результатам их выступлений на кафедре и докладам на конференциях, сдают экзамен или дифференцированный зачет комиссии под председательством заведующего кафедрой или ответственного за направление учебно-исследовательской работы студентов.

7. Высшим признанием успехов студента является решение кафедры о выдаче студенту задания на дипломное проектирование на основе полученных им результатов научных исследований и опытно-конструкторских работ.

4.2. Составление отчета по индивидуальному заданию учебно-исследовательской работы студента



Учебно-исследовательская работа студента по индивидуальному заданию должна завершаться техническим отчетом. Ответственность за правильность и своевременность составления отчета возлагается на студентов — исполнителей работы; прием отчета и заключение о проделанной работе осуществляет научный руководитель. Заключение руководителя утверждается профилирующей кафедрой.

Отчет по исследовательской работе является основным документом, в котором излагаются подробные результирующие данные о выполнении задания. В отчете отражается цель работы, содержится полное описание исследования, методика проведения исследования, обеспечение и оснащение экспериментов, полученные результаты, частные технические решения, полученные в процессе исследований, и т.д. Научно-технический отчет должен составляться в соответствии с ГОСТ 7.32–2001 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

Отчет характеризуется:

- ☐ четкостью построения;
- ☐ логической последовательностью изложения материала;
- ☐ убедительностью аргументации;
- ☐ краткостью и точностью формулировок;
- ☐ конкретностью изложения результатов работы;
- ☐ доказательностью выводов и рекомендаций.

Отчет должен содержать текстовую, литературно обработанную часть с соответствующими выкладками, формулами, таблицами расчетных, статистических или экспериментальных данных, рисунками, графиками, схемами и фотографиями, профилограммами, осциллограммами, диаграммами, другими материалами самопишущих приборов и т.д. Отбираемый для включения в отчет материал должен быть соответствующим образом обработан и апробирован. Следует стремиться к тому, чтобы таблицы, формулы и иллюстрации, вместе с точностью и достоверностью, отличались выразительностью и наглядностью. Если график дает более нагляд-

ную картину процесса или явления, чем таблица, то в отчет предпочтительнее помещать график.

Методики расчетов, не являющиеся принципиально новыми, следует в отчете опускать, сославшись при этом на источник, откуда заимствована данная методика. При вычислениях в подобных случаях дается только окончательный результат. Это не касается исследовательских и опытно-конструкторских работ, где расчеты являются главным содержанием.

В отчет не следует включать методики испытаний, описание оборудования или измерительной аппаратуры серийного производства, сведения из широко доступных литературных источников и т.п., т.е. нужно избегать включения в отчет сведений, полученных не в ходе выполнения данной учебно-(научно)исследовательской работы.

Графический материал и условные обозначения должны соответствовать действующим ГОСТам и другим нормативным документам. Термины и определения должны быть едиными на протяжении всего отчета и соответствовать нормативам и стандартам, а при их отсутствии — общепринятым в научно-технической литературе.

Структура и состав отчета должны обеспечить возможность легкого извлечения из него необходимой информации. Отчет должен включать следующие составные части:

1. Титульный лист.
2. Реферат.
3. Оглавление.
4. Введение.
5. Аналитический обзор (в случае необходимости).
6. Обоснование выбранного направления исследований и конструирования (или выбранного метода решения задачи).
7. Основная часть отчета, излагающая собственно научно-исследовательскую или опытно-конструкторскую работу и полученные в процессе этого результаты.
8. Заключение с указанием перспективы дальнейшего совершенствования и развития.
9. Список использованной литературы.
10. Приложения.
11. Перечень сокращений, символов и специальных терминов с их определением (в случае необходимости).

Образец *титульного листа* представлен на рис. 4.3.

В *реферате* должно быть отражено содержание проведенной работы, методы решения рассматриваемых вопросов и наиважнейшие полученные результаты. Реферат не должен подменять содержание (оглавление) отчета. Основное назначение реферата — дать краткую информацию о проведенной научно-исследовательской работе. В конце реферата должно быть указано количество томов (книг), страниц отчета, библиографий и иллюстраций, содержащихся в отчете.

Введение должно давать краткую оценку современного состояния проблемы (в случае если отчет не содержит аналитического обзора), увязывать тему исследований с развитием науки и промышленности и излагать цель работы. Во введении должна быть сформулирована связь данной работы с предшествующими работами по данному вопросу, указаны заимствованные материалы.

Министерство вуз Кафедра	
УДК 629.114.004.67	УТВЕРЖДАЮ
	Научный руководитель темы « ____ » _____ 20 ____ г.
ОТЧЕТ	
по учебно-исследовательской работе «Исследование износостойкости деталей автомобиля ГАЗ-53 в зависимости от качества обработки рабочих поверхностей»	
Исполнитель:	
студент группы _____	
Город. 20 ____ г.	

Рис. 4.3. Титульный лист отчета по учебно-исследовательской работе студента

В качестве составной части введения допустимо помещать индивидуальное задание.

Аналитический обзор должен содержать систематизированное и критическое изложение состояния вопроса. Предметом анализа в обзоре должны служить только новые идеи и проблемы и возможные подходы к решению этих проблем. Противоречивые сведения, содержащиеся в различных источниках, должны быть проанализированы и оценены с особой тщательностью.

Аналитический обзор допускается объединять с введением.

Обоснование выбора направления работы (или метода решения задачи) осуществляется либо на подготовительном этапе учебно-исследовательской работы, либо на первом из основных этапов. В первом случае обоснованием выбора может быть завершен аналитический обзор состояния вопроса (проблемы), во втором — обоснование лучше давать отдельно. В любом из этих случаев обоснование выбранного направления исследований и конструирования должно опираться на рекомендации, содержащиеся в аналитическом обзоре, и учитывать конкретные условия места проведения работы. Не нужно обосновывать выбор направления научно-исследовательской работы ссылками на соответствующие пункты индивидуального задания. Не следует смешивать обоснование выбора направления исследований и обоснование целесообразности (или необходимости) самой работы. Обоснование целесообразности (необходимости) работы обусловлено заданием на проведение работы и должно быть отражено во введении.

В *основной части отчета* излагаются общие сведения о содержании работы и ее этапов. Приводится четкое описание изучаемого явления; излагаются физические, химические или иные представления о механизме явления; дается описание выполненных основных теоретических и экспериментальных исследований в систематизированном изложении с необходимым анализом и обобщениями, сопровождаемыми расчетами, иллюстрациями (диаграммами, таблицами, графиками, рисунками и т.д.); приводится сравнение данных, полученных в результате проработки вопроса, с результатами аналогичных отечественных и зарубежных исследований и конструкторских разработок. Желательно увязать проводимые исследования и конструирование с заданиями и потребностями народного хозяйства страны.

В отчете об экспериментальном исследовании необходимо описать методику проведения экспериментов; оценить точность и достоверность полученных данных; сопоставить полученные результаты с теоретическими и другими экспериментальными данными. Следует перечислить примененные приборы и аппаратуру. В случае если для выполнения эксперимента были созданы специальные устройства и измерительная аппаратура, в отчете следует привести их основные (выходные) данные и принципиальные схемы устройства и действия.

Заключение должно содержать оценку результатов работы с точки зрения их соответствия требованиям задания. Необходимо в заключении перечислить возможные области применения полученных результатов, определить пути дальнейших исследований или мотивированно указать на целесообразность их продолжения.

В *списке литературы* следует приводить все использованные источники, в том числе малотиражные документы и отчеты. Описания использованных литературных источников и других произведений печати должны соответствовать ГОСТ 7.32–2001.

При включении в список использованной литературы отчетов о научно-исследовательских работах следует указывать их названия, наименования организаций, составивших отчеты, и инвентарные номера отчетов.

Список литературы должен быть составлен единообразно. Каждый источник имеет в нем следующую структуру; порядковый номер в списке; фамилия (в разрядку) и инициалы автора; заглавие книги (для статьи ее заглавие, название сборника или журнала, его номер); издательство, место, год выпуска; страницы, где расположен заимствованный материал или полное число страниц источника. В списке литературы следует помещать (в случае необходимости) перечень использованных патентных материалов.

В *приложения* выносятся иллюстративный материал, таблицы, подробные математические выкладки, текст вспомогательного характера, если расположение их в основном тексте отчета перегружает материал и мешает изложению главной мысли.

Описание частных технических решений, полученных в процессе выполнения работы, также следует помещать в приложениях. В основной части отчета нужно давать лишь ссылки на соответствующие приложения.

Перечень сокращений, символов и специальных терминов необходимо приводить только том случае, если сокращений, символов и терминов много. В противном случае их следует представлять и расшифровывать в сносках при первом появлении в тексте. Термины с их определением следует перечислять в алфавитном порядке.

Научно-технический отчет по индивидуально заданию учебно-исследовательской работы студента разрешается оформлять рукописным способом на одной стороне листа белой нелинованной бумаги формата А4 (ГОСТ 7.32–2001).

По всем четырем сторонам листа оставляются свободные поля (рис. 4.4).

Основная часть отчета, отражающая методику, содержание и результаты выполненной работы, как правило, разделяется на главы (разделы), которые подразделяются на параграфы (подразделы), а последние, если это целесообразно, на пункты.

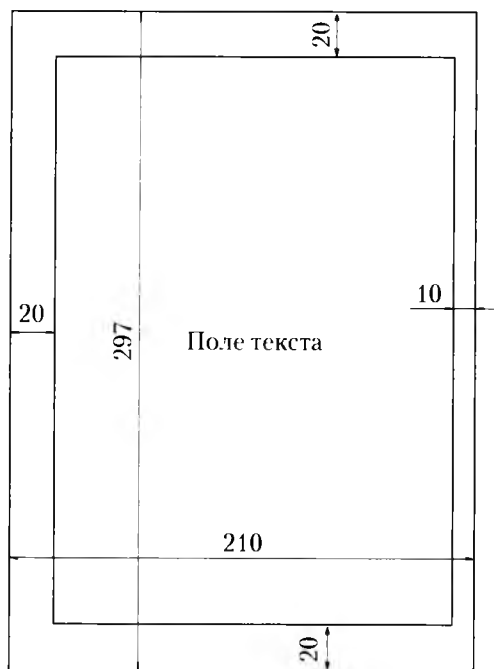


Рис. 4.4. Расположение поля текста на печатном листе

«Введение», «Аналитический обзор», а затем разделы основной части отчета и «Заключение» нумеруются арабскими цифрами по порядку в пределах всего отчета.

Подразделы нумеруются арабскими цифрами в пределах каждого раздела, например «4.1» — первый подраздел четвертого раздела. Пункты нумеруются арабскими цифрами в пределах каждого раздела, например «4.1.3» — третий пункт первого подраздела четвертого раздела.

Разделы и подразделы основной части отчета должны иметь содержательные заголовки; в начале заголовка ставится соответствующий номер (слова: раздел, подраздел, пункт не пишутся).

Все иллюстрации (фотографии, схемы, рисунки и др.) именуется рисунками и нумеруются последовательно в пределах раздела арабскими цифрами, например «рис. 4.2» — второй рисунок четвертого раздела. При ссылке на рисунок следует указывать его полный номер, например «см. рис. 4.2». Рисунки должны размещаться сразу после ссылки на них в тексте отчета и после номера сопровождаются содержательной надписью. Надписи на рисунках выполняются чертежным шрифтом единообразно по размеру на протяжении всего отчета.

Таблицы, помещаемые в отчет, нумеруются отдельно от рисунков, но также последовательно в пределах каждого раздела, например «таблица 3.1» — первая таблица третьего раздела. Таблицу следует помещать после первого упоминания о ней в тексте или на следующей странице и сопровождать ее сразу же после номера содержательным заголовком.

Формулы, на которые имеются ссылки в тексте, должны нумероваться в пределах раздела арабскими цифрами, заключенными в скобки, например (4.1) — первая формула четвертого раздела. При ссылке в тексте на формулу необходимо указывать ее полный номер в скобках, например «в формуле (3.2)...».

При ссылке в тексте на источники информации следует приводить порядковый номер источника по списку литературы, заключенный в квадратные скобки, например «[17]».

Нумерация страниц отчета должна быть сквозной: первой страницей является титульный лист, второй — бланк индивидуального задания, третьей — реферат, четвертой — содержание (оглавление) и т.д. На титульном листе номер страницы 1 не ставится, на после-

дующих страницах номера проставляют арабскими цифрами в середине нижнего поля страницы.

Отчет сдается на кафедру после проверки его научным руководителем в переплетенном (сброшюрованном) виде. Рекомендуется отчет переплетать (брошюровать) с защитной обложкой (полукarton, ватман и т.п.). При этом надписей на обложке делать не следует.

4.3. Оформление доклада и текста рукописи статьи для опубликования



Оформление доклада. Текст научного доклада оформляется в произвольной форме и должен содержать:

- ☐ титульный лист (рис. 4.5);
- ☐ основную часть, содержащую методику исследований и результаты выполненных исследований;
- ☐ конкретные сведения, раскрывающие содержание основной части доклада (технические характеристики разработанного станка, приспособления, параметры процесса, инструменты и т.д.);
- ☐ краткие выводы относительно особенностей, эффективности, возможностей и области применения полученных результатов.

Доклад иллюстрируется рисунками, графиками, фотографиями и другими графическими материалами, выполненными на отдельных листах и размещенными по тексту. Иллюстрации должны иметь свои номера (рис. 1, рис. 2 и т.д.).

В конце доклада указывается использованная литература с указанием фамилии и инициалов автора, названия источника, места издания, издательства, года издания и страниц, где расположен использованный материал. Общий объем доклада, как правило, не должен превышать 10 страниц.

Научный доклад является распространенной формой научных произведений. Поскольку на изложение научного доклада обычно отводится ограниченное время (10...15 мин), то основные положения его должны быть краткими и конкретными. В докладе красной нитью должна проходить центральная идея и необходимая аргументация ее обоснования. Иллюстрации для доклада перед аудиторией рекомендуется выполнять на листах формата 24,

Министерство втуз Кафедра		Экз. № ____
Повышение работоспособности подвижных сопряжений редукторов обработкой заготовок деталей поверхностным пластическим деформированием		
Научный доклад		
Студенты группы	_____	Борец В.А.
	_____	Буллах А.И.
	(подпись)	
Научный руководитель	_____	Горохов В.А.
д.т.н., проф.	(подпись)	
Город. 20 ____ г.		

Рис. 4.5. Титульный лист текста доклада

на пленках, слайдах, в электронном виде (при возможности использования технических средств). Умение просто и доходчиво излагать материал перед коллегами по учебе является делом сложным, достигается после нескольких тренировок и свидетельствует об уровне подготовки и научной эрудиции студента.

Подготовка рукописей статей и других материалов для опубликования. Статья и другой материал, подготавливаемые к опубликованию, должны содержать концентрированный материал результатов выполненных исследований. Перед тем как приступить к написанию статьи, необходимо составить ее план. Такой план не только облегчает подготовку рукописи, но и позволяет выдерживать логическую последовательность излагаемого материала с минимальными затратами времени на написание. Подготовленный начальный вариант рукописи следует многократно прочесть и отредактировать материал. Объем статьи, подготовленной для опубли-

кования в журнале, не должен превышать, как правило, 6 страниц; объем статей для сборников может достигать 12 и даже более страниц машинописного текста.

Текст статьи представляется в напечатанном виде на электронном или бумажном носителе через два интервала на одной стороне белой бумаги формата А4. Поля страниц рукописи должны быть не менее: левое — 20 мм, верхнее и нижнее — 20 мм, правое — 10 мм (см. рис. 4.4).

Заголовки и подзаголовки следует отделять от основного текста сверху и снизу двумя межстрочными интервалами и печатать строчными буквами.

При подготовке текста в рукописном виде для последующего печатания формулы и буквенно-цифровые выражения желательно вписывать черными чернилами (пастой) или тушью. Точка (знак умножения) в формулах ставится перед числом, выраженным цифрой, а также перед дробью, например:

$$\frac{2c \cdot 5\alpha}{4f \cdot 8k}, \quad 13 \cdot \frac{\alpha + 2b}{c}, \quad \frac{f + bk}{m} \cdot \frac{5b + \alpha}{c - k}.$$

Формулы размечаются чернилами (цветом, отличным от цвета чернил, которыми они вписаны).

Формулы и знаки, вписываемые от руки, следует размещать несколько реже, чем при обычном письме, для обеспечения выполнения их разметки.

При разметке формул и знаков следует руководствоваться следующими правилами.

Под прописными (большими) буквами одинакового со строчными начертания ставить две черточки снизу, например:

$$\underline{\underline{C}}, \underline{\underline{K}}, \underline{\underline{V}}, \underline{\underline{S}}, \underline{\underline{Z}}, \underline{\underline{X}}, \underline{\underline{P}}, \underline{\underline{M}}, \underline{\underline{W}}.$$

При разметке строчных (малых) букв две черточки ставить над буквой, например:

$$\overline{\overline{c}}, \overline{\overline{k}}, \overline{\overline{v}}, \overline{\overline{s}}, \overline{\overline{z}}, \overline{\overline{x}}, \overline{\overline{p}}, \overline{\overline{m}}, \overline{\overline{w}}.$$

Прописные и строчные латинские буквы подчеркиваются волнистой чертой, буквы греческого алфавита обводятся красным кружком. Условные сокращения различных математических функций (латинскими буквами), а также русские индексы и латинские $\max$ и $\min$ подчеркиваются прямой чертой с загнутыми концами.

Показатели степени отмечаются знаком повышения, а индексы — знаком понижения. Подчиненные показатели степени и индексы отмечаются вторыми соответствующими знаками.

Все расчеты производятся по Международной системе СИ.

Заголовок статьи оформляется по образцу:

УДК 621.923

И.Н. Безгин

Исследование микрогеометрии поверхности при обработке заготовок деталей редукторов вибрационным алмазным выглаживанием.

Список литературы приводится в алфавитном порядке или по мере упоминания источников в тексте. Если число авторов в приводимой в списке статье не более трех, то указываются: фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала (сборника), год издания, номер журнала, страницы, на которых расположен использованный материал (от и до). Для книги пишутся фамилии и инициалы авторов, полное название книги, место издания, издательство, год издания и полное число страниц.

Если книга (статья) написана больше чем тремя авторами, весь авторский коллектив приводится после наименования источника, а источник располагается в списке литературы по заглавию книги (статьи).

Рисунки должны быть последовательно пронумерованы, без пропусков и повторения номеров. На 10 страницах текста, как правило, должно быть 3–4 рисунка; на 6–8 страницах — 2 рисунка; на 3–4 страницах — 1 рисунок. Рисунки выполняются в соответствии с ГОСТом и правилами черчения.

На полях подготовленных для печати рисунков указываются фамилии авторов, название статьи, номер рисунка; кроме того, на полях делаются карандашом пометки: «верх», «низ».

Подрисуночные надписи на начальной стадии подготовки материала даются на отдельных страницах. На все рисунки должны быть ссылки в тексте, а на полях чернового варианта должно быть указано место рисунка по тексту, т.е. перед местом расположения рисунка в прямоугольнике указывается его номер.

Таблицы также должны иметь свои номера и на них также следует давать ссылки в тексте.

К статье прилагается реферат, составленный в соответствии с ГОСТом.

К статье могут прилагаться также акт экспертизы, выписка из протокола заседания кафедры, на котором заслушивались материалы статьи, с рекомендацией к опубликованию.

4.4. Описание комплексной лабораторной работы по курсу «Основы научных исследований»



В лабораторный практикум [4] включен необходимый учебный и методический материал, литературные источники по измерительно-усилительным средствам, применяемым в технологических исследованиях; обработке экспериментальных данных графического характера (профилограммы, осциллограммы, графики и т.п.); исследованию эксплуатационных свойств деталей с различными параметрами микрогеометрии рабочих поверхностей и упрочнения подповерхностных слоев материала; обобщению научных результатов и оформлению отчета.

Работа называется «Измерительно-усилительные средства, обработка экспериментальных данных и исследование эксплуатационных свойств деталей машин». При выполнении работы все студенты изучают оборудование и оснастку для осуществления обработки образцов, профилограф-профилометр завода «Калибр» мод. 201 или 250, осциллограф типа Н-700 и другие средства. Задание на исследовательскую часть работы каждый студент (допускается бригада 2–3 человека) получает индивидуально. В этом задании отражается материал образцов, их размеры, метод обработки рабочей поверхности, измеряемые параметры микрогеометрии поверхности и подповерхностного слоя материала, конкретное эксплуатационное свойство, на которое будут испытываться образцы, устройство для испытания, оборудование.

В лабораторный цикл входят следующие самостоятельные этапы:

1. Аналитический обзор по одному из способов обработки ППД или вибрационным резанием (конкретизируется преподавателем). Этот этап выполняется студентом самостоятельно по литературным

источникам в библиотеке или дома и является подготовительным к основным этапам.

2. Подготовка и обработка образцов. Изучение микрометрии поверхности, устройство и работа профилографа-профилометра, измерение параметров микрометрии, снятие и обработка профилограмм поверхности образцов (лабораторные занятия — 6 ч).

3. Изучение аппаратуры (осциллографов и др.) и исследование параметров технологического процесса. Обработка осциллограмм. Тарировка приборов, корректирование процесса обработки с вибрацией инструмента (лабораторные занятия — 6 ч).

4. Исследование эксплуатационного свойства (износостойкости, противозадирности, прирабатываемости и др.) цилиндрических образцов с микрорельефом, обеспечиваемым способами обработки резанием и ППД. Обобщение результатов экспериментов методами математической статистики (лабораторные занятия — 6 ч).

5. Оформление отчета (выполняется студентом самостоятельно).

Аналитический обзор (этап 1) должен полно и систематизированно излагать состояние вопроса, которому посвящена данная учебно-исследовательская работа или одно из ее направлений. В обзоре объективно излагается оценка научно-технических достижений и недостатки в решении определенных моментов по рассматриваемой теме. По результатам анализа предлагается возможное направление исследований, выбор пути и средств достижения поставленной цели.

Предметом анализа в обзоре должны быть передовые идеи решения проблемы, возможные подходы к ее решению, результаты подобных исследований по близким и смежным проблемам, данные экономического характера, примеры практического применения результатов предыдущих исследований и возможные направления дальнейших экспериментов.

При выполнении этапа 2 предлагается:

□ изучить параметры шероховатости поверхности по ГОСТ 2789–73, их обеспечение и методы контроля;

□ изучить параметры РМР по ГОСТ 24774–81, их обеспечение и методы контроля;

□ ознакомиться с устройством и работой профилографа-профилометра, получить навыки подготовки прибора к работе, изме-

рения среднего арифметического отклонения профиля Ra и снятия профилограмм с различных поверхностей;

□ изучить методику обработки профилограмм и определения параметров шероховатости и РМР;

□ определить параметры микрогеометрии: Ra , Rz , $R_{\max}$, tp , S , Sm , r , $r/R_{\max}$ и другие в соответствии с заданием.

Устройство прибора, работа на нем, методика определения параметров микрогеометрии описаны в учебном пособии [4]. Помимо стандартизированных параметров, в пособии предусмотрены не стандартизированные параметры, например радиус r скругления вершин неровностей, отношение $r/R_{\max}$ и методика их расчета по профилограммам. На рис. 4.6 показана микронеровность с профилограммы и ее параметры. При расчете параметров следует тщательно учитывать масштабы горизонтального M_x и вертикального M_y увеличения. Для примера можно привести расчет радиуса r скругления неровности:

$$r = \frac{M_y}{8M_x^2} \cdot \frac{b^2}{h}, \text{ мм},$$

где b — ширина основания микронеровности, мм; h — высота микронеровности от основания до вершины, мм (измеряются по профилограмме).

При выполнении этапа 2 необходимо определить требуемые параметры и среднее квадратическое отклонение значений r_i от $\bar{r}$.

Полученные данные обработки профилограмм вносятся в протокол наблюдений, примерная форма которого приведена в табл. 4.1.

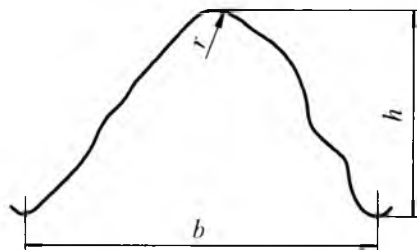


Рис. 4.6. Схема выступа шероховатости поверхности (с профилограммы)

Таблица 4.1

Протокол наблюдений № _____ от «___» _____ 20__ г.

Объект исследования и его обработка	Условия исследования			Параметры							Примечания
	M_l	M_b	l	R_z	R_{max}	tp	S	Sm	r	r/R_{max}	
Валики из алюминиевого сплава Д16. резание											
Валики из сплава Д16. ППД											
Выводы											

Далее указывается влияние заданных параметров (табл. 4.1) на прочность посадок, износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость, отражение волн и другие эксплуатационные свойства. У деталей, обработанных ППД, изменяется структура подповерхностного слоя материала, микротвердость, степень и глубина упрочнения, что дополнительно улучшает сопротивление ползучести, прочность материала и посадок, повышает электрическое сопротивление упрочненного слоя.

Целью этапа 3 является ознакомление с аппаратурой для исследования технологического процесса вибрационной обработки, получение навыков тарировки приборов и обработки осциллограмм. Этап выполняется на базе виброустановки ВУ-1, созданной на базе станка КТС-250 [9].

При выполнении этапа необходимо:

☐ изучить принцип работы, расположение и назначение рукояток и тумблеров осциллографа, подготовку к работе и порядок работы на приборе;

☐ составить блок-схему измерительно-отключающего устройства вибросверлильной установки и составить тарированный график по параметрам, указанным руководителем;

☐ выполнить обработку осциллограммы с целью определения параметров режима процесса.

Для исследования параметров технологического процесса применяются электрические методы измерения неэлектрических величин. Они позволяют с достаточной точностью производить замеры и регистрацию быстро и медленно протекающих процессов,

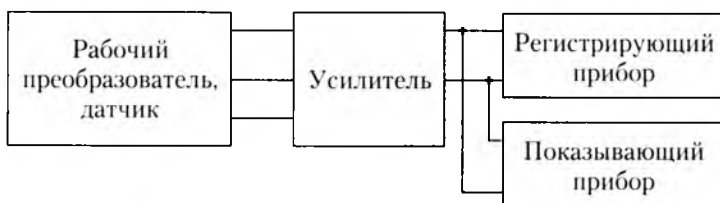


Рис. 4.7. Принципиальная схема аппаратуры для измерения неэлектрических величин электрическими методами

не оказывая существенных воздействий на сам изучаемый процесс. Общая принципиальная схема аппаратуры для электрических методов измерения неэлектрических величин показана на рис. 4.7.

Рабочий преобразователь состоит из воспринимающей части и датчика. Воспринимающая часть «следит» за изучаемым процессом (например, вибросверлением), а датчик непосредственно преобразует изучаемую неэлектрическую величину в электрическую.

Датчики делятся на энергетические и параметрические. Наиболее широко для исследования технологического процесса используются тензорезисторы (тензодатчики), относящиеся к параметрическим датчикам. Тензорезисторы могут быть проволочными и фольговыми.

Усилители используются для усиления электрического сигнала, возникающего в измерительной схеме, и передачи его на регистрирующий прибор. Усилитель подобран таким образом, чтобы рабочая полоса частот удовлетворяла частотам изучаемого процесса. Рабочая полоса частот отражается в паспортах регистрирующих приборов, в качестве которых могут использоваться амперметры, вольтметры, катодный и шлейфовый осциллографы.

Обработка результатов эксперимента обычно сводится к расшифровке осциллограмм, их анализу, статистической обработке полученных данных и представлению этих данных в виде рядов, таблиц, графиков или математических моделей. Для облегчения последующей обработки материалов целесообразно вести протокол наблюдений подобно протоколу, представленному в табл. 4.1.

Осциллограммы можно обмерять с помощью планиметров, линейки и других средств. При измерении амплитуд процесса необ-

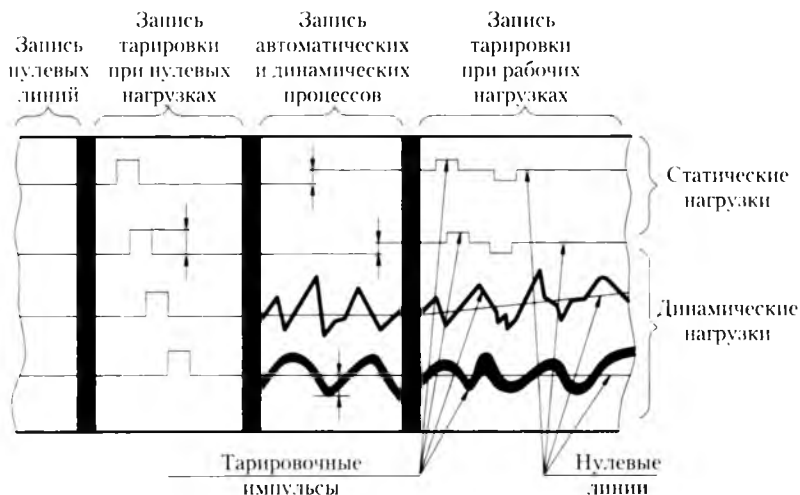


Рис. 4.8. Образец записи осциллограмм

ходимо постоянно проверять положение нулевой (базисной) линии, от которой измеряется ордината кривой, ломаной линии (рис. 4.8).

Часто при обработке осциллограмм требуется устанавливать частоты, с которыми протекает процесс. По отметкам времени осциллограмм определяется период T колебаний в секундах. Частота f (Гц) процесса определяется из выражения

$$f = \frac{1}{T}.$$

Для определения числовых значений исследуемых параметров M необходимо сделать тарировку воспринимающей части аппаратуры по показаниям h , при этом воспринимающая часть должна работать в пределах упругих деформаций и обеспечивать возможность получения линейных тарировочных характеристик.

После тарировки для убыстрения перевода показаний h приборов (значений по осциллограммам) в величины исследуемого параметра M строится тарировочный график (рис. 4.9).

Расшифровка осциллограмм осуществляется в обратном направлении: $M = F(h)$. Получаемый посредством эксперимента материал содержит значительный элемент случайности. Случайную функцию $x(t)$ можно рассматривать как совокупность случайных значений X .

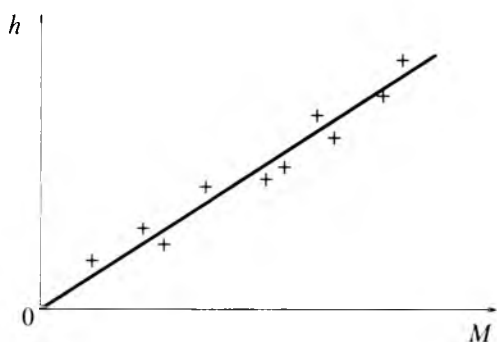


Рис. 4.9. Тарировочный график зависимости $h = f(M)$

При определении значений исследуемых величин рекомендуется придерживаться следующей последовательности статистической обработки:

- результаты каждого частного измерения $x_1, x_2, \dots, x_n$ случайной величины X отражаются в таблице протокола;
- вычисляется среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

- определяется среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Целью исследования, проводимого на этапе 4, является определение рационального (близкого к оптимальному) варианта чистовой обработки рабочих поверхностей (например, вибрационным резанием, ППД и вибрационным ППД). По усмотрению руководителя студенту или бригаде студентов предлагается провести исследование на образцах из какого-либо материала (сталь, медный, алюминиевый, титановый сплавы). Количество разновидностей обработки должно быть не менее трех. На каждый способ обработки предусматривается минимум три образца. Образцы обрабатываются предложенными способами с примерно одинаковой высотой R_z микронеровностей поверхности.

После промывки, сушки обдувкой, нумерации и выявления разновидностей микрорельефа поверхности в виде колец образцы

взвешиваются не менее трех раз каждый и устанавливаются на одну оправку. Истирание осуществляется на токарно-винторезных станках чугунными колодками в смазанном состоянии посредством многоместного приспособления (оправка с пружинным поджимом колодок). Силы поджима колодок к образцам принимаются одинаковыми.

После одного или нескольких циклов истирания образцы вновь тщательно промываются и обдуваются воздухом. Затем осуществляется повторное троекратное взвешивание каждого образца на аналитических весах типа ВД-200 или других с показом значений.

В расчет принимаются средние значения масс образцов до и после испытания истиранием.

В качестве технического обеспечения этапа 4 лабораторного практикума используются токарно-винторезные станки; специальные устройства с тарированными пружинами и чугунными колодками; многоместная оправка для установки 10 образцов в виде колец; приспособления для алмазного выглаживания и вибровыглаживания, накатывания и вибронакатывания шарами, виброголовка (источник вибраций), приспособления с профильными синусоидальными и косинусоидальными роликами для вибронакатывания без источников вибрации; ванна для промывки образцов со щеткой; инструменты для регулировки приспособлений по силе поджима деформирующих элементов и колодок к образцам при обработке и испытании, установки образцов и весов.

Результаты исследования вносятся в протокол испытания с отражением заданных исходных данных (рис. 4.10).

Для наглядности рекомендуется построение графика зависимости массового износа от микрорельефа поверхности и упрочнения подповерхностного слоя материала образцов с указанием среднего квадратического отклонения $\pm\sigma$ (рис. 4.11). Наилучшим способом обработки признается тот, который обеспечивает наименьший износ образцов, т.е. наивысшую износостойкость.

В заключение рекомендуется прокомментировать полученные результаты, сделать выводы и дать рекомендации по применению прогрессивных процессов обработки рабочих поверхностей деталей с обеспечением их улучшенных свойств в различных условиях эксплуатации. Отчет по комплексной лабораторной работе должен иметь приведенную выше структуру от титульного листа до перечня

Исследователь	Иванов И.М.														
Дата исследования	12.04.2014 г.														
Станок	Токарно-винторезный мод. 1Е61М														
Приспособление	Многоступенчатая оправка, многоступенчатое устройство для истирания, резец, виброголовка с алмазным шлифовальщиком														
Испытуемые образцы	Кольца с наружной рабочей поверхностью														
Материал:	Сталь 45														
	Серый чугун СЧ 10														
Число циклов (оборотов) испытания	24 тыс.														

Вид обработки	Виды микрорельефов	Параметры режима обработки ППД					Значение подповерхностного упрочнения металла	Масса образцов до истирания, г			Масса образцов после истирания, г			Уменьшение массы образцов, мг			Среднее арифметическое значение потери массы, мг
		$n, \text{мин}^{-1}$	$S, \text{мм/об}$	$P, \text{Н}$	$n_{\text{шк}}, \text{мин}^{-1}$	$2A, \text{мм}$		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
								Образец			Образец			Образец			

Рис. 4.10. Пример протокола испытания с отражением исходных данных

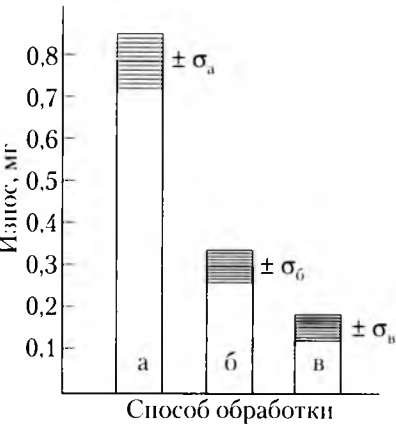


Рис. 4.11. Зависимость массового износа от способов обработки (микрорельефов) поверхностей и упрочнения материалов:
а — точение (шероховатость, без упрочнения материала); б — гладкое обкатывание шаром (ПРМР с упрочнением подповерхностного слоя материала); в — двойное виброобкатывание профильным роликом (ПРМР + ЧРМР с более высоким упрочнением подповерхностного слоя материала)

использованной литературы или (в случае необходимости) до приложений.

Реферат должен отражать объект и цель исследований, методы, метрологию их проведения, результаты и основные технико-эксплуатационные характеристики, возможность использования и рекомендации по практическому применению в какой-либо конкретно конкретной области, технико-экономическую эффективность возможного внедрения прогрессивной технологии, предложения по совершенствованию использованных в исследовании способов обработки.

Во введении должно быть кратко охарактеризовано развитие современных машино- и приборостроения, роль научно-экспериментальных исследований подобного типа в развитии прогрессивных видов обработки заготовок в производстве, а также более развернуто изложена цель работы. Введение должно четко формулировать актуальность выполнения подобных экспериментально-поисковых работ в заводском секторе науки и их научно-техническую эффективность (качество деталей, их свойства, производительность обработки).

В основной части (этапы 2, 3, 4) отчета следует отражать методику, содержание исследований и их результаты. Особенно подробно должна отражаться методика исследований. Измерительно-усилительные средства необходимо описывать с указанием их возможностей, пределов измерений и силовых факторов со схемами, иллюстрирующими устройство и работу. Обрабатываемые профилограммы и осциллограммы целесообразно аккуратно снимать на кальку для показа всего цикла их обработки. Полученные результаты желательно сводить в таблицы (протоколы) наблюдений и показывать на графиках с сопровождением их научными комментариями.

В разделе отчета, посвященном описанию экспериментов (этап 4), следует излагать их сущность со схемами обработки и истирания образцов, оценивать точность и достоверность полученных результатов со сравнением их с данными из литературных источников.

Заключение отчета должно содержать оценку результатов, выводы и предложения по совершенствованию процессов обработки и исследований.

Отчет должен завершаться оценкой результатов и их влияния на технико-экономическую эффективность производства и эксплуатации изделий.

4.5. Примеры содержания исследовательских дипломных и курсовых проектов



Дипломный проект выпускника Н.Н. Новохацкого «Создание виброустановки на базе токарно-винторезного станка мод. 1Е61МТ с обеспечением прецизионных вибросверления и виброточения» состоит из пояснительной записки объемом 150 страниц (со списком использованной литературы из 37 наименований, приложением на 15 страниц, 34 иллюстрациями и 17 таблицами) и графической части на 12 листах формата А1.

Пояснительная записка включает следующие разделы, подразделы:

1. Введение.
2. Обзор обработки резанием с вибрацией режущего инструмента.
3. Конструкторская часть.
 - Выбор и обоснование конструкции станка.
 - Расчет привода главного движения.
 - Расчет ременной передачи привода главного движения.
 - Расчет механизма подачи.
 - Проектирование вибросверлильной головки.
 - Устройство и работа.
 - Расчет пружины золотника.
 - Расчет и выбор электродвигателя привода кулачка.
 - Расчет ременной передачи вариатора.
 - Расчет приводного вала.
 - Расчет и выбор подшипников качения.
 - Расчет пружины вариатора.
 - Проектирование виброголовки суппорта.
 - Устройство и работа.
 - Расчет и выбор электродвигателя привода головки.
 - Расчет рычага.
 - Расчет привода колебаний резцедержателя.

- Расчет ролика и рычага на контактные напряжения.
- Расчет насосной станции привода вибросверлильной головки.
- Расчет насосной станции подачи СОЖ через канал вибросверла.
- Расчет устройства патрона зажима вибросверла.
- Устройство и работа патрона.
- Расчет тонкостенной пружинной втулки.
- Расчет сил зажима и крутящего момента на гайке.
- Расчет и подбор подшипников качения.
- Расчет привода быстрого отвода вибросверлильной головки.
- Работа привода быстрого отвода.
- Выбор электродвигателя и расчет ременной передачи.
- 4. Электрооборудование установки и его обслуживание.
 - Общие сведения.
 - Размещение электрооборудования.
 - Указания по обслуживанию электрооборудования.
- 5. Автоматизация и механизация установки.
 - Электронное устройство управления вибросверлильной головкой.
 - Элементы автоматизации электрооборудования установки.
- 6. Охрана труда и техника безопасности.
 - Обеспечение безопасности работы на установке.
 - Расчет заземляющего устройства.
- 7. Экономическая часть проекта.
 - Ресурсосбережение при модернизации и эксплуатации виброустановки.
 - Расчет экономической эффективности применения виброобработки и электронного устройства.
 - Расчет экономической эффективности применения виброустановки на базе токарно-винторезного станка мод. 1Е61МТ.
 - Список литературы.
 - Приложения.
 - Перечень чертежей проекта на листах:
 - 1. Кинематическая схема виброустановки.
 - 2. Принципиальная электрическая схема виброустановки.
 - 3, 4. Вибросверлильная головка.
 - 5. Патрон для установки вибросверла.
 - 6. Принципиальная схема электронного устройства.

7, 8. Виброголовка резцедержателя.

9. Привод автоматического отвода инструмента при его затуплении.

10, 11. Блок насосных станций и электрического управления.

12. Гидравлическая схема установки.

Перечень рассмотренных вопросов и разработанных чертежей говорит о достаточно высоком уровне проекта и творческой эрудиции разработчика. Студент Н.Н. Новохацкий на протяжении всего периода обучения занимался научной проблемой резания с вибрацией инструмента. Он выступал на конференциях, участвовал в написании статей, писал научные обзоры с анализом состояния проблемы, делал курсовые проекты в этом направлении по ряду курсов.

Ниже приводится краткая аннотация рассмотренного выше дипломного проекта.

«За счет модернизации токарно-винторезного станка мод. 1Е61МТ путем изменения его кинематики, оснащения двумя виброголовками и другими узлами создана прецизионная виброустановка для обработки заготовок из труднообрабатываемых никелевых сплавов типа ХН82ТЮМБ с регулируемой вибрацией инструмента. При этом обеспечена возможность более полного использования технологических возможностей станка.

Применение установки позволяет сократить штучное время при сверлении отверстий малого диаметра (2...10 мм) глубиной до 100 мм в 2 раза, затраты на режущий инструмент при этом снижаются в 6 раз за счет исключения поломок вибросверл. Стойкость инструмента при виброточении повышается на 25...40 %. Применение на установке пьезоэлектрических датчиков, отключающего электронного устройства и устройства быстрого отвода инструмента позволяет использовать полный ресурс работы инструмента (без поломок), автоматизировать управление движениями и организовать многостаночное обслуживание.

Применение установки для обработки заготовок из труднообрабатываемых металлов (никелевых, титановых сплавов, жаропрочных сталей) с вибрацией инструментов обеспечивает годовой экономический эффект в размере 44 220 у.е. при времени окупаемости затрат на модернизацию и дооснащение станка 0,5 года».

Курсовой проект по курсу «Детали машин» студентов Г.А. Вадимова и В.М. Трубачева «Межцеховая инерционная тележка грузоподъемностью 0,5 т» посвящен созданию тележки с приводом ведущих колес через редуктор от раскрученного на специальной электроустановке маховика особой конструкции.

Перечень рассмотренных и решенных вопросов характеризуется следующим содержанием пояснительной записки.

1. Введение.

2. Обзор материалов по использованию инерционных автомобилей и тележек в Швейцарии и других странах.

3. Проектирование системы маховика.

Выбор материала, расчет массы и формы сечения маховика для обеспечения движения при заданных грузоподъемности, сопротивлении движению и времени эксплуатации тележки за один цикл раскручивания.

Расчет оси вала маховика.

Расчет и конструирование подвески маховика.

Расчет и выбор подшипников качения.

Расчет вариатора для бесступенчатого регулирования скорости движения тележки в период вращения маховика с затухающей частотой.

Расчет и конструирование устройства переключения маховика от трансмиссии на его раскручивание, и наоборот.

Расчет сцепления трансмиссии.

Расчет мощности электродвигателя станции раскручивания маховика.

4. Проектирование ходовой части тележки.

Расчет размеров платформы тележки с учетом размеров маховика и ширины проездов в цехах.

Расчет прочности ограждения маховика.

Расчет на прочность несущих балок подвески маховика.

Расчет подвески передних колес.

Расчет подвески задних колес.

Расчет и выбор подшипников качения колес.

Расчет и конструирование управления поворотом передних колес.

Расчет и конструирование системы тормозов.

5. Определение режима работы тележки.

6. Возможности и эффективность использования тележки на предприятиях.

«Студенты Г.А. Вадимов и В.М. Трубачев с первого года обучения активно участвовали в работе научных кружков при общетехнических кафедрах. Они писали рефераты по курсам «Сопротивление материалов», «Теория машин и механизмов», «Техническая механика». Выступали с докладами на студенческих научно-технических конференциях и кафедральных семинарах. В последующие годы обучения они перешли в сферу научной деятельности на специальных кафедрах и завершили студенческий путь разработкой дипломных проектов исследовательского характера. За разработанную тележку они получили премию Министерства высшего образования СССР.

Инерционная тележка по проекту могла развивать скорость до 15 км/ч, ресурс работы от раскручивания до раскручивания с учетом стоянок под погрузку-разгрузку — 1 ч. По сравнению с аккумуляторными электрокарами она экологически безопасна, менее прихотлива в обслуживании и может обеспечить определенный экономический эффект».

«Студенты А.Е. Петрилин и Е.М. Замалин по заданию на технологическую практику изучали возможности инструментального цеха и отработывали технологию изготовления профильных роликов. Они предложили изготавливать эти ролики для использования в массовом производстве штамповкой (из стали) и порошковой металлургией (из твердого сплава). В качестве курсового проекта по курсу «Проектирование инструмента» обоснована и разработана новая технология изготовления синусоидальных и косинусоидальных профильных роликов с переменными параметрами радиальных гофр, которая впоследствии заменила технологию производства роликов путем механической и слесарной обработки.»

«Студенты Ф.И. Точилин и Т.И. Булах, участвуя во внедрении процесса вибросверления на заводе, обратили внимание на частые поломки вибросверл малого диаметра (3...10 мм) с каналом для внутреннего привода СОЖ. Совместно с технологами инструментального участка они занялись отработкой технологии производства этих вибросверл и создали новую технологию изготовления и заточки вибросверл. Их курсовой проект по курсу «Технология машиностроения» был посвящен этой проблеме.»

В качестве примера ниже описан один из указанных выше курсовых проектов под названием «Проектирование техпроцесса изготовления вибросверл диаметром 3 мм с разработкой цангового патрона, протяжного устройства и комплекта фильер». Проект состоит из расчетно-пояснительной записки на 83 страницах и графической части на 4 листах формата А1 (2 листа технологических наладок, 1 лист чертежей прецизионного цангового патрона, цанги и фильер, 1 лист чертежа протяжного устройства).

Во введении приведен обзор существующих конструкций спиральных и прямых сверл для глубокого вибросверления с напайками твердого сплава и без них; применяемых материалов для сверл, термических и химико-термических обработок; способов соединения пластин твердого сплава с корпусом, техпроцессов изготовления инструмента. Определены направления совершенствования технологического процесса.

В технологической части записки обоснован выбор заготовки, необходимые расчеты параметров режима ее обработки, обоснованно подобраны оборудование, обрабатывающие и измерительные инструменты, приспособления, СОЖ; описаны используемые наладки.

В конструкторской части записки приведены расчеты размеров цанг и их хода, пружин; дано обоснование конструкции прецизионного цангового патрона с набором цанг. Отражен расчет набора фильер с внутренним диаметром через 0,1 мм; обоснована с необходимыми расчетами конструкция протяжного устройства.

В экономической части записки дан анализ причин «скручивания» режущей части с пластинкой твердого сплава сверл и оставлением ее в недосверленном отверстии заготовок (неисправленный брак), продольного изгиба их корпусов. Рассчитаны затраты, вызванные преждевременным выходом из строя инструмента и браком деталей, материалом которых являются дорогостоящие никелевые и титановые сплавы, легированные стали со специальными свойствами.

В выводах представлены предложения по увеличению прочности режущей части и жесткости прямых вибросверл диаметром 3 мм в процессах их производства и эксплуатации.

Приложением к записке является «Технологический процесс изготовления вибросверл (диаметр 3 мм)» на маршрутных картах, который внедрен в производство и описан ниже.

Материал: корпус вибросверла — сталь 20 ГОСТ 1050–80, заготовка — труба $\varnothing 6 \times 0,8$ (сортамент ГОСТ 8734–75, технические требования ГОСТ 8733–74); пластина твердого сплава ВК8 ГОСТ 2209–90.

Условные обозначения цехов и отделов: заготовительный — З; инструментальный — И; термический — Т; гальванический — Г; отдел технического контроля — ОТК; склад готовой продукции — СГП.

(З) Операция 000. Заготовительная.

1. Протянуть трубу через фильеры с целью обеспечения внутреннего отверстия трубы диаметром 0,6 мм (протяжной станок, протяжное устройство с прихватом, набор фильер с $d_{\text{вн}}$ через 0,1 мм, контрольная пробка $\varnothing 0,6$ мм).

2. Отрезать заготовку длиной 210 мм (токарно-отрезной полуавтомат СИ-02; цанговый патрон с гильзой направляющей; резец отрезной специальный; штангенциркуль 0...320 мм).

(И) Операция 005. Токарная.

1. Подрезать торцы заготовки с двух сторон в размер $205_{-0,5}$.

2. Центровать (фаски) заготовку с двух сторон (токарный станок мод. 1И611П; патрон цанговый; резец подрезной, сверло центровочное $\varnothing 1$; штангенциркуль 0...320 с ценой деления — ц.д. 0,1).

(И) Операция 010. Слесарная.

1. Рихтовать заготовку при необходимости до биения не более 0,1 мм (верстак, плита рихтовочная, молоток, призма, индикатор с ц.д. 0,01 мм).

(И) Операция 015. Токарная.

1. Обточить заготовку по наружной поверхности до $\varnothing 4_{-0,12}$ за две или одну установку с люнетом (токарный станок мод. И611П, цанговый патрон, резец проходной Т15К6, микрометр 0...25 мм).

(И) Операция 020. Шлифовальная.

1. Шлифовать заготовку поверху до $\varnothing 3,5_{-0,06}$ по всей длине, несоосность отверстий $\varnothing 0,6$ не более 0,1 мм (бесцентрово-шлифовальный станок мод. ЗГ182, круг шлифовальный ПП Э50СТ1К, микрометр 0...25, центра, индикатор с ц.д. 0,01).

(Т) Операция 025. Термическая.

1. Цементировать заготовку с последующей рихтовкой до биения не более 0,1 мм на длине 100 мм (камерная печь: призма, кар-

бюризатор — уголь, $T = 920 \pm 10$ °С, $\tau = 8...10$ ч, сквозная цементация; индикатор с ц.д. 0,01).

(ОТК) Операция 030. Контрольная.

1. Проверить биение наружной поверхности (не более 0,1 мм) на длине 100 мм (стол контролера, призма, индикатор со стойкой и ц.д. 0,01).

(И) Операция 035. Шлифовальная.

1. Шлифовать круговые лыски с двух сторон, выдержав толщину $2,3 \pm 0,05$ мм на длине 140 мм с несимметричностью 0,05 мм относительно оси заготовки (плоскошлифовальный станок мод. ЗГ71; плита магнитная с упорами и прижимами цехового изготовления; круг шлифовальный ПП Э50СМ1К с закругленной периферией; штангенциркуль с ц.д. 0,05; микрометр 0...25 мм).

(И) Операция 040. Фрезерная.

1. Фрезеровать паз под пластину твердого сплава глубиной $9,5 \pm 0,1$ мм и шириной $0,7 \pm 0,1$ мм (универсально-фрезерный станок мод. 6В75; делительная головка, цанговый патрон; фреза прорезная $\varnothing 32 \times 0,8$ при необходимости с доведенной или прошлифованной по ширине 0,8 мм; штангенциркуль с ц.д. 0,1; калибр для контроля ширины паза).

(И) Операция 045. Сверлильная.

1. Сверлить два отверстия $\varnothing 0,5 \pm 0,1$ перпендикулярно канавкам для выхода стружки под углом 60° со стороны паза к оси корпуса. Ось отверстия $\varnothing 0,5$ по поверхностям канавок должна находиться на расстоянии $10,5 \pm 0,1$ мм от торца корпуса у паза (настольно-сверлильный станок НС-12; цанговый патрон; сверло $\varnothing 0,5$; пробка $\varnothing 0,5$; шаблон специальный; штангенциркуль с ц.д. 0,05).

(И) Операция 050. Слесарная.

1. Притупить острые кромки, снять заусеницы.
2. Прочистить отверстия $\varnothing 0,6$ и $\varnothing 0,5$, продуть сжатым воздухом.
3. При необходимости рихтовать заготовку до биения не более 0,1 мм на длине 100 мм (верстак: тиски лекальные; надфили, шабер, стальная проволока $\varnothing 0,5$; индикатор с ц.д. 0,01 со стойкой).

(И) Операция 055. Моечная.

1. Промыть корпус (ванна УЗВ, уайт-спирит).

(ОТК) Операция 060. Контрольная.

1. Проверить размеры предыдущих операций (стол контролера с набором указанного выше контрольного инструмента).

(Г) Операция 065. Травильная.

1. Обезжирить под пайку корпус и пластину твердого сплава (моечно-травильный агрегат).

(И) Операция 070. Слесарная.

1. Изолировать центральное и боковые отверстия от попадания припоя асбестовым шнуром.

2. Собрать твердоплавную пластину с пластинками припоя АНМц 06-4-2 и корпусом, не допуская попадания загрязнений (верстак; перчатки бязевые, тиски лекальные; приспособление цеховое; стальная проволока $\varnothing 0,5$; пинцет МРТУ).

(ОТК) Операция 075. Контрольная.

1. Контролировать сборку и соответствие входящих элементов.

(Т) Операция 080. Паяльная.

1. Паять твердоплавную пластину в пазу корпуса при температуре 1150...1260 °С (установка ТВЧ мод. ЛЗ-2-67; индуктор петлевой цеховой; ток анода 1,6...2,0 А; ток сетки 0,3...0,6 А; напряжение анода 8,0...8,2 кВ).

(Г) Операция 085. Осветление.

1. Удалить нагар и потемнения в местах пайки.

(ОТК) Операция 090. Контрольная.

1. Проверить качество пайки; заготовки с трещинами и раковинами на швах браковать (отправлять на подпайку).

(И) Операция 095. Слесарная.

1. Прочистить центральное и боковые отверстия, промыть и продуть сжатым воздухом (верстак, тиски, стальная проволока $\varnothing 0,5$).

(Т) Операция 100. Термическая.

1. Термообработать корпус путем закалки при $T_3 = 810 \pm 10$ °С с $\tau_3 = 3...5$ мин и отпуска при $T_0 = 350...400$ °С с $\tau_0 = 45...60$ мин до твердости 52...56 HRC с последующей рихтовкой до биения не более 0,1 мм на длине 100 мм (термопечь камерная СНЗ-4.8.4; призма; среда охлаждения: масло индустриальное И-20, подогретое до температуры 80...120 °С; индикатор с ц.д. 0,01 со стойкой).

(И) Операция 105. Токарная.

1. Притереть и довести центровую фаску (токарный станок; патрон цанговый; шкурка шлифовальная).

(И) Операция 110. Шлифовальная.

1. Шлифовать за две установки корпус сверла до $\varnothing 3,2_{-0,1}$ без твердоплавной пластины (круглошлифовальный станок мод. ЗБ151П;

цанговый патрон; центр; круг шлифовальный ПП Э50СМ1К; микрометр 0...25 мм).

(Т) Операция 115. Старение.

1. Произвести старение корпуса сверла для снятия внутренних напряжений в материале (термопечь).

(И) Операция 120. Шлифовальная.

1. Шлифовать корпус со стороны твердого сплава до $\varnothing 3_{-0,02}$ на длине $45 \pm 0,2$ (круглошлифовальный станок мод. ЗБ151П; патрон цанговый; центр; круг шлифовальный АСПП; скоба 0...25; набор концевых мер).

(И) Операция 125. Шлифовальная.

1. Шлифовать корпус со стороны хвостовика до $\varnothing 2,9_{-0,05}$ на длине $60 \pm 0,2$ мм с радиальным биением в пределах 0,02...0,05 мм (круглошлифовальный станок мод. ЗБ151П; патрон цанговый; центр; круг шлифовальный ПП Э50СМ1К; микрометр 0...25 мм; штангенциркуль с ц.д. 0,05).

(И) Операция 130. Шлифовальная.

1. Шлифовать среднюю часть корпуса до $\varnothing 2,9_{-0,05}$, не нарушая размеров хвостовых частей (бесцентровошлифовальный станок мод. ЗГ182; круг шлифовальный ПП Э50СМ1К; микрометр 0...25 мм; штангенциркуль с ц.д. 0,05).

(ОТК) Операция 135. Контрольная.

1. Проверить чистовые диаметральные размеры корпуса сверла (стол контролера, инструмент контрольно-измерительный).

(И) Операция 140. Заточная.

1. Произвести предварительную заточку рабочей части сверла с доработкой скосов и входящих канавок по чертежу (универсальный заточный станок мод. ЗВ642; приспособление цеховое; круг шлифовальный АСПП; угломер универсальный; штангенциркуль с ц.д. 0,05).

(И) Операция 145. Слесарная.

1. Притупить острие кромки, снять заусенцы.

2. Проверить и при необходимости прочистить осевое и выходные отверстия.

3. Промыть и продуть сверла сжатым воздухом (верстак; ванна; надфили, брусок К350СИ1К).

(И) Операция 150. Заточная.

1. Произвести окончательную заточку вибросверла с выдерживанием $2\varphi = 140^\circ$; $\alpha = 12^\circ$; $\alpha_1 = 17^\circ$; $\alpha_2 = 8^\circ$; $b = 0,7...0,05$ и других размеров по чертежу.

(И) Операция 155. Гравировальная.

1. Написать на хвостовике диаметр и индекс вибросверла (верстак, электроустройство, электрокарандаш).

(И) Операция 160. Моечная.

1. Промыть и обдуть готовые вибросверла (ванна УЗВ; уайт-спирит).

(ОТК) Операция 165. Контрольная.

1. Контролировать размеры, обеспеченные заточкой инструмента согласно чертежу.

(СП) Операция 170. Консервационно-упаковочная.

1. Окунуть вибросверла в расплавленный смазочный материал ПВК и оставить на воздухе до его затвердевания.

2. Завернуть каждое вибросверло в парафинированную бумагу.

3. Упаковать в пакеты по 10 штук.

4. Наклеить на пакеты ярлыки с информацией о продукции и ее изготовителе.

Описанный техпроцесс, несмотря на его некоторую растянутость, оказался эффективным и обеспечил качество (прямолинейность) вибросверл, увеличил их жесткость на скручивание и продольный изгиб, повысил прочность режущей части. Инструментальщики приняли технологический процесс и внедрили его в производство. Так был решен вопрос обеспечения качества и конкурентоспособности самых маленьких по диаметру прямых вибросверл. В дальнейшем в оснащение были внесены поддерживающие круглые втулки и втулки с фасонным отверстием по наружному сечению корпуса сверла, спроектировано настраиваемое на предельно допустимый угол скручивания вибросверла устройство с датчиковой системой, что практически полностью исключило поломку сверл и доведение их только до предельно допустимого затупления.

Приведенные примеры выполнения проектов исследовательского характера свидетельствуют об их пользе в становлении будущего инженера-экспериментатора, поисковика творческих решений, создателя новых конструкций и технологий. В этом плане

желательно охватывать студентов исследованиями с первого курса, этому будет способствовать назначение кураторов в группы первокурсников из числа преподавателей специальных кафедр.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Как может быть организована научно-исследовательская подготовка будущих инженеров в вузе?
2. По каким направлениям может обеспечиваться научно-исследовательская подготовка будущих специалистов машиностроения в стенах вуза и на промышленных предприятиях в периоды производственных практик?
3. В чем заключается учебно-исследовательская работа студента?
4. Каким может быть индивидуальное задание студенту (бригаде студентов) по учебно-исследовательской работе?
5. Как составляется отчет по выполнению задания по учебно-исследовательской работе студента?
6. Какими путями можно включиться в научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу с первого курса обучения в вузе?
7. Как готовится и оформляется доклад (тезисы доклада) на научно-технической конференции, кафедральном семинаре и т.п.?
8. Как готовится и оформляется рукопись статьи для опубликования?
9. Приведите пример комплексной лабораторной работы по курсу «Основы научных исследований».
10. Приведите примеры научно-исследовательских работ студентов на общениженерных кафедрах.
11. Приведите примеры тем и содержания научно-исследовательских курсовых проектов по специальным дисциплинам.
12. Каково содержание учетной карточки по учебно-(научно-)исследовательской работе студента?
13. Приведите примеры научно-исследовательских дипломных проектов технологического и конструкторского направлений.
14. Какие темы можно использовать в качестве научно-исследовательских разделов курсовых и дипломных проектов?
15. Какую цель преследует написание аналитического обзора по выбранной теме?

Список использованных источников

1. Башков В.М. Испытание режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. М. : Машиностроение, 1985. 130 с.
2. Герасимович А.И. Математическая статистика / А.И. Герасимович, Л.И. Матвеева. Минск : Вышэйш. шк., 1978. 200 с.
3. Гиссин В.И. Управление качеством продукции: учеб. пособие / В.И. Гиссин. Ростов н/Д : Феникс, 2000. 256 с.
4. Горохов В.А. Измерительно-усилительные средства, обработка экспериментальных данных и исследование эксплуатационных свойств деталей машин: учеб. пособие — лабораторный практикум по курсу «Основы научных исследований» / В.А. Горохов. Чернигов : Минвуз УССР, КПИ, 1980. 72 с.
5. Горохов В.А. Развитие теории микрогеометрии и метрологии технических поверхностей / В.А. Горохов // Весці НАН Беларусі. Серия фізико-тэхнічных наук. 2007. № 2. С. 28–39.
6. Горохов В.А. Оснастка для поверхностного пластического деформирования в автоматизированном производстве: учеб. пособие / В.А. Горохов. Минск : БелНИИНТИ, 1992. 108 с.
7. Горохов В.А. Регуляризация микрорельефов поверхностей изделий машиностроения / В.А. Горохов. М. : ВНИИТЭМР, 1989. 48 с.
8. Горохов В.А. Использование вибрации в обработке металлических деталей: материал для студентов вузов / В.А. Горохов. Чернигов : КПИ, ВСНТО, 1980. 76 с.
9. Горохов В.А. Технология обработки материалов: учебное пособие / В.А. Горохов. Минск : Беларуская навука, 2000. 439 с.
10. Горохов В.А. Учебная исследовательская работа студентов (УИРС) в учебном процессе: метод. указания / В.А. Горохов. Киев : Минвуз УССР, КПИ, 1980. 20 с.
11. Демкин Н.Б. Качество поверхностей и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. М. : Машиностроение, 1981. 226 с.
12. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения: учеб. пособие / М.М. Кане. Минск : Вышэйш. шк., 1987. 231 с.
13. Математическая обработка результатов эксперимента / В.К. Калоша [и др.]. Минск : Вышэйш. шк., 1982. 103 с.
14. Махаринский Е.И. Основы теории проектирования технических систем: учеб. пособие / Е.И. Махаринский, Ю.Е. Махаринский, В.И. Ольшанский. Витебск : ВГТУ, 1998. 237 с.
15. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника / под ред. П.П. Мальцева. М. : Техносфера, 2006. 151 с.
16. Рабинович С.Г. Погрешности измерений / С.Г. Рабинович. Л. : Энергия, 1978. 261 с.
17. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И.С. Солонин. М. : Машиностроение, 1972. 215 с.

18. *Спиридонов А.А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. М. : Машиностроение, 1981. 184 с.
19. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын [и др.]. Минск : Наука и техника, 1977. 255 с.
20. *Шенк Х.* Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. М. : Мир, 1972. 381 с.
21. *Шнейдер Ю.Г.* Технология финишной обработки давлением: справочник / Ю.Г. Шнейдер. СПб. : Политехника, 1998. 414 с.
22. *Ящерицын П.И.* Планирование эксперимента в машиностроении: справ. пособие / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. Минск : Вышэйш. шк., 1985. 286 с.
23. Энциклопедия систем жизнеобеспечения. Нанонаука и нанотехнологии / главные соредакторы О.О. Акадельkrim, Чунъли Бай, С.П. Капица. М. : Магистр Пресс, 2009. 992 с.

Литература для расширения кругозора, творческого приобщения к научно-исследовательской деятельности и выбора направления научной деятельности

1. Адлер Ю.П. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее / Ю.П. Адлер, Ю.В. Грановский, Е.В. Маркова. М. : Знание, 1982. 64 с.
2. Алиев Т.А. Экспериментальный анализ / Т.А. Алиев. М. : Машиностроение, 1991. 271 с.
3. Андриевский Р.А. Наноконструкционные материалы: учеб. пособие / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. М. : Академия, 2005. 192 с.
4. Байбурин В.Б. Модели и методы планируемого эксперимента: учеб. пособие / В.Б. Байбурин, Р.П. Кутепов. Саратов: СГТУ, 1994. 50 с.
5. Берков В.Ф. Логика научно-технического творчества / В.Ф. Берков, Р.З. Джиджян. Минск : Университетское, 1986. 48 с.
6. Валдайцев С.В. Экономическое обоснование исследований и разработок / С.В. Валдайцев, П.А. Родионов, В.Е. Мосалев. Л. : ЛГУ, 1981. 145 с.
7. Витязь П.А. Основы нанотехнологий и наноматериалов: учеб. пособие / П.А. Витязь, Н.А. Свидуневич. Минск : Вышэйш. шк., 2010. 303 с.
8. Горохов В.А. Математическое моделирование шершавых поверхностей / В.А. Горохов, И.М. Конторович, Е.И. Махаринский // Повышение эксплуатационных свойств деталей технологическими методами. Иркутск, 1988. С. 91–99.
9. Горохов В.А. Расчет экономической эффективности технологического процесса с учетом обеспечиваемых эксплуатационных свойств деталей / В.А. Горохов. Киев : УкрНИИИТП, 1985. 24 с.
10. Горохов В.И. Знать, чтобы делать: история инженерной профессии и ее роль в современности / В.И. Горохов. М. : Знание, 1987. 173 с.
11. Дикарев В.И. Справочник изобретателя / В.И. Дикарев. СПб. : Лань, 2001. 351 с.
12. Добровольский И.Г. Основы научной работы: наука как процесс получения информации: учеб. пособие / И.Г. Добровольский. Минск: Технопринт, 2001. 103 с.
13. Исследования и изобретательство в машиностроении: практикум / И.Л. Баршай, Г.Я. Беляев, О.Г. Дивойно [и др.]; под ред. М.М. Кане. Минск : Технопроект, 2003. 237 с.
14. Каракац В.В. Экономика НИР и ОКР: учеб. пособие / В.В. Каракац. Л. : ЛФЭИ, 1985. 71 с.
15. Кармалита В.А. Точность результатов автоматизированного эксперимента / В.А. Кармалита, В.Э. Лобанов. М. : Машиностроение, 1992. 204 с.

16. *Кожухар В.М.* Основы научных исследований: учеб. пособие / В.М. Кожухар. М. : Дашков и К, 2010. 216 с.
17. *Колмогоров А.Д.* Избранные труды. В 6 т. Т. 2. Теория вероятности и математическая статистика / А.Д. Колмогоров. М. : Наука, 2005. 581 с.
18. *Кузнецов И.Н.* Научное исследование: методика проведения и оформление / И.Н. Кузнецов. М. : Дашков и К, 2004. 428 с.
19. *Кулаичев А.П.* Методы и средства комплексного анализа данных / А.П. Кулаичев. М. : Форум, 2005. 460 с.
20. *Кучур С.С.* Научные исследования и решение инженерных задач: учеб. пособие / С.С. Кучур, М.М. Болбас, В.К. Ярошевич. Минск : Адукацыя і выхаванне, 2003. 315 с.
21. *Лойко А.И.* Основы научных исследований: метод. пособие / А.И. Лойко, М.И. Терликова, В.И. Канарская; под ред. А.И. Лойко. Минск : БНТУ, 2012. 82 с.
22. *Лукашевич В.К.* Основы методологии научных исследований: учеб. пособие / В.К. Лукашевич. Минск : Элайда, 2001. 104 с.
23. *Махаринский Е.И.* Основы теории проектирования технических систем: учеб. пособие / Е.И. Махаринский, Ю.Е. Махаринский, В.И. Ольшанский. Витебск : ВГТУ, 1998. 237 с.
24. *Мерсон А.Л.* Качество научного труда / А.Л. Мерсон, Н.И. Ханов. Л. : Лениздат, 1986. 135 с.
25. *Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника* / под ред. П.П. Матьцева. М. : Техносфера, 2006. 151 с.
26. *Новичихин Р.В.* Моделирование производственных систем обработки деталей в машино- и приборостроении / Р.В. Новичихин, Е.Р. Новичихина. Минск : БНТУ, 2010. 309 с.
27. *Герасимов Г.И.* Основы научных исследований: учеб. пособие / Б.И. Герасимов [и др.]. М. : Форум, 2011. 269 с.
28. *Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов* : учебник. В 2 ч. / В.А. Горохов, А.Г. Схиртладзе, Н.В. Беляков [и др.]; под ред. В.А. Горохова. Старый Оскол : ТНТ, 2011. Ч. 1. 496 с. Ч. 2. 576 с.
29. *Половинкин А.И.* Основы инженерного творчества / А.И. Половинкин. М. : Машиностроение, 1988. 364 с.
30. *Поплавская П.Я.* Методология научных исследований / П.Я. Поплавская. Минск : Информпресс, 2007. 182 с.
31. *Пул Ч.П.* Нанотехнологии: учеб. пособие / Ч.П. Пул, Ф.Д. Оуэнс. М. : Техносфера, 2005. 334 с.
32. *Романюк Ф.А.* Теория и практика инженерного эксперимента / Ф.А. Романюк, Б.А. Каледни. Минск : БНТУ, 351 с.
33. *Рыжиков Ю.И.* Имитационное моделирование. Теория и технология / Ю.И. Рыжиков. СПб. : Корона принт, 2004. 384 с.

34. *Рыков А.С.* Модели и методы системного анализа: принятие решений и оптимизация / А.С. Рыков. М. : Руда и металлы, 2005. 352 с.
35. *Свифт К.Г.* Выбор процесса — от разработки до производства / К.Г. Свифт, Д.Д. Кукер. М. : Технологии, 2006. 400 с.
36. *Севриков В.В.* Методология и организация научных исследований: учеб. пособие / В.В. Севриков. Минск : Дикта, Мисаната, 2012. 371 с.
37. *Силье Г.* От мечты к открытию: как стать ученым / Г. Силье; пер. с англ. Н.И. Войскунской; общ. ред. М.Н. Кондрашовой, И.С. Хорола. М. : Прогресс, 1987. 366 с.
38. Справочник научного работника / А.Р. Мацюк [и др.]. Киев : Наукова думка, 1989. 327 с.
39. *Старостин В.В.* Материалы и методы нанотехнологий: учеб. пособие / В.В. Старостин. М. : Бином, 2008. 431 с.
40. Технология обработки материалов: учебник / В.А. Горохов, Ф.И. Пантелеенко, В.Д. Ефремов [и др.]; под ред. П.И. Ящерицына. М. : Славянская школа, 2004. 750 с.
41. Энциклопедия систем жизнеобеспечения. Нанонаука и нанотехнология / гл. соредакторы О.О. Акадельkrim, Чуньли Бай, С.П. Капица. М. : Магистр Пресс, 2009. 992 с.

Учебное издание

Высшее образование

Горохов Вадим Андреевич

ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ИХ ПРОВЕДЕНИЯ

Учебное пособие

Ответственный за выпуск *С.В. Исаенко*

Оригинал-макет подготовлен ООО «Новое знание»

Подписано в печать 23.12.2015.

Формат 60×90 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура Петербург.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 40.94. Уч.-изд. л. 35.02.

Тираж 240 экз. Заказ № 4844.

Общество с ограниченной ответственностью «Новое знание».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/276 от 04.04.2014.

Пр. Пушкина, д. 15, ком. 16, Минск, Республика Беларусь.

Почтовый адрес: а/я 79, 220050, Минск, Республика Беларусь.

Телефон/факс: (10-375-17) 211-50-38

E-mail: nk@wnk.biz

<http://wnk.biz>

Отпечатано в типографии ООО «Полиграфт».

ЛП № 02330/466 от 21.04.2014 г.

Ул. Кнорина, 50, корп. 4, к. 401а, 220050, Минск, Республика Беларусь.

ИЗДАТЕЛЬСТВО



“НОВОЕ ЗНАНИЕ”

Для записей

Наши координаты:

в Минске: (+375-17) 211-50-38, e-mail: sale@wnk.biz

<http://wnk.biz>