В.П. БАХАРЕВ, А.П. ДУБИНИН,
А.Г. СХИРТЛАДЗЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В двух частях

Часть 2
Моделирование и прогнозирование развития технических систем машиностроения

Под редакцией профессора А.Г. Схиртладзе

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Старый Оскол
«ТНТ»
2009

УДК 621
ББК 34.42
Б 30

Рецензент
доктор технических наук, с.н.с. кафедры технической и экспериментальной физики Ивановского государственного университета *А.Г. Наумов*

Бахарев В.П., Дубинин А.П., Схиртладзе А.Г.

Б 30 Проектирование и конструирование в машиностроении: учебное пособие: В 2-х ч. Ч. 2. Моделирование и прогнозирование развития технических систем машиностроения / В.П. Бахарев, А.П. Дубинин, А.Г. Схиртладзе; под редакцией проф. А.Г. Схиртладзе. — Старый Оскол: ТНТ, 2009. — 196 с.

ISBN 978-5-94178-197-3

Пособие рассматривает вопросы моделирования реальных технических систем машиностроительного производства и организации активной самостоятельной творческой учебно-поисковой деятельности через обучение системному анализу технических систем в процессе проектирования и эксплуатации, приобщению к методологии математического моделирования и инженерного творчества.

Пособие включает в себя четыре главы:

— первая глава посвящена методологическим основам системного подхода при рассмотрении некоторых вопросов технологии машиностроения. Рассмотрены современные аспекты анализа и количественной оценки состояния технических систем машиностроения, общие вопросы моделирования технических систем на основе синергетического подхода;

— вторая глава содержит методически обоснованную информацию учебного материала по созданию математических моделей гидромеханических систем машиностроения;

— в третьей главе рассмотрено практическое использование математических моделей в процессе проектирования и эксплуатации гидропневматических опор скольжения, а также управления физическими процессами при абразивной обработке;

— четвёртая глава рассматривает различные подходы к проблемам развития технических систем машиностроения, описаны некоторые прогрессивные, наукоёмкие технологии машиностроения.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Учебное пособие может быть полезно инженерно-техническим работникам предприятий машиностроения и специалистам, занимающимся вопросами модернизации и перевооружения производства.

УДК 621
ББК 34.42

ISBN 978-5-94178-197-3

© Бахарев В.П., Дубинин А.П., Схиртладзе А.Г., текст, 2009
© Оформление. ООО «ТНТ», 2009

О, сколько нам открытий чудных
Готовят просвещенья дух,
И опыт, сын ошибок трудных,
И гений, парадоксов друг,
И случай, бог изобретатель...

А.С. Пушкин

Это лирическое вступление мы сделали для того, чтобы отметить, какое важное значение просвещению и творчеству личности, которому придают выдающиеся представители человечества и предложить студентам путь к первоначальному движению в сфере познания.

Первоначальное движение (ауфтакт) — это такое движение, «...которое включает в себя целый космос, потому что всё предыдущее личность включает опосредованным, компактным образом в это движение» [13]. Таким первоначальным движением является акт самоосознания себя, состоящий в самооценке своего интеллектуального уровня, степени актуализации своего творческого потенциала. Именно образная (имагинативная) сфера способствует эффективной учебно-познавательной деятельности человека, активизации её творческой составляющей. «Человек, который не осознаёт себя, конечно же, не сможет применять массу приёмов, уже разработанных человечеством для того, чтобы хорошо усваивать какие-либо знания и предметы» [13].

Самостоятельное решение творческих заданий, поставленных в процессе курсового или дипломного проектирования самим студентом, способствует возникновению актуализированного интереса к дисциплине и к методам её познания. Они ведут «...нашу мысль на тропинку, весьма полезную для прогулок в интроспективно-психологических пределах, — на тропинку актуализированного интереса» [13]. Эти первые, самостоятельные и осознанные шаги творческого мышления ведут к преодолению шаблонности, к навыкам, позволяющим охватывать действительность во всех её проявлениях. В отличие от обучения понятийному и логическому мышлению, творческие

задания, для своего решения, требуют подвергать все усвояемые понятия и методы критике и оценке, не ограничиваясь рамками логики и имеющихся установок. Практика применения заданий такого типа подтверждает, что факты и явления, пока ещё не систематизированные как понятия, всё-таки отражаются сознанием с помощью воображения, постоянная тренировка которого приводит к развитию и формированию нестандартного мышления, к развитию свободы в рассуждениях. Без фантазии нет творчества. Когда человек может фантазировать и творить? Когда он свободен! Что означает свобода в учении? Это учебная деятельность, происходящая под всеобъемлющей властью интереса! Когда процесс мышления эффективен? Автодидактика отвечает: когда нам интересно.

Экстраполируя сегодняшние тенденции в развитии науки и техники, можно предположить, что не за горами появление новых междисциплинарных подходов к изучению технических объектов, в основе которых лежат принципы синергетики, что значительно расширит её возможности в решении задачи формирования и развития у студентов системного творческого инженерного мышления. С этих позиций мы предлагаем подходить к изучению любого учебного материала.

Ниже (гл. 4) рассматриваются некоторые подходы к развитию творческого инженерного мышления в рамках профессиональной подготовки по направлению — «Конструкторско-технологическое обеспечение автоматизированного машиностроительного производства». Материал отдельных глав пособия изложен таким образом, что появляется возможность автономного его использования в соответствии с учебными целями и задачами. Такая структура позволяет обеспечить дифференцированный подход к учебно-познавательной деятельности.

Общее научное редактирование осуществлено д.п.н., проф. Схиртладзе А.Г.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ГА — генетические алгоритмы
ГТ — генеративные технологии
ВиАО — виброабразивная обработка
ИКР — идеальный конечный результат
ИНС — искусственная нейронная сеть
МУ — моменты увода
НС — надсистема технической системы (ТС)
ПС — подсистема технической системы (ТС)
СЗМ — сканирующая зондовая микроскопия
СО — системный оператор
СОТС — смазочно-охлаждающая технологическая среда
ТП — технологический процесс
ТС — техническая система
ЭНИМС — Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков
ЭИ — электрод-инструмент
ФН — формальный нейрон
ЧЭ — чувствительный элемент

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A — комплексный безразмерный показатель $A = \dfrac{2\tau_0\delta}{\mu\omega_2 R_2}$,

A — постоянная величина;
B — ширина круга, мм.;
$\vec{\Phi}$ — единичная массовая сила;
D — диаметр цапфы;
d — диаметр вкладыша;
l — длина цапфы;
ω — угловая скорость вращения цапфы;
p — гидродинамическое давление;
$\overrightarrow{p_x}, \overrightarrow{p_y}, \overrightarrow{p_z}$ — напряжения, действующие в плоскостях, нормальных осям x, y, z декартовой системы координат;

p_{xx}, p_{yy}, p_{zz} — проекции векторов $\overrightarrow{p_x}, \overrightarrow{p_y}, \overrightarrow{p_z}$ на нормаль к плоскостям их действия (нормальные напряжения);

$p_{xy}, p_{xz}, p_{yx}, p_{yz}, p_{zx}, p_{zy}$ — проекции векторов $\overrightarrow{p_x}, \overrightarrow{p_y}, \overrightarrow{p_z}$ на оси y, z (касательные напряжения);

τ_0 — предельное напряжение сдвига;

μ — динамический коэффициент вязкости;

K_B — коэффициент распределения давления по ширине шлифовального круга (определяется экспериментально);

$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$ — локальная или местная производная;

$\nabla = i\frac{\partial}{\partial x} + j\frac{\partial}{\partial y} + k\frac{\partial}{\partial z}$ — оператор Гамильтона (условный вектор);

$grad\ p = \nabla p = i\frac{\partial}{\partial x} + j\frac{\partial}{\partial y} + k\frac{\partial}{\partial z}$ — градиент давления (нормального напряжения) в вязкой жидкости;

$div\ \vec{V} = \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z}\right)$ — дивергенция (расхождение) вектора (сумма частных производных от проекции вектора скорости по одноимённым координатам);

$\lambda_1 = \mu_v - 2\mu/3$ — коэффициент, связывающий объёмную (μ_v) и динамическую (m) вязкость среды;

$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$ — тензор скоростей деформаций;

$\nabla^2 = \Delta = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа (лапласиан).

V_z — продольная скорость течения жидкости;

$\lambda_{mp} = \frac{64}{Re}$ — коэффициент гидравлического трения;

$Re = \frac{Vd}{\nu}$ — число Рейнольдса;

$\xi = \frac{W\psi^2}{ld\varpi\mu}$ — коэффициент нагруженности подшипника (W — несущая способность подшипника);

$\varepsilon = \frac{N2\psi}{ld^2\omega^2\mu}$ — коэффициент сопротивления цапфы вращению (N — потеря мощности на преодоление сил сопротивления вращению цапфы в подшипнике);

$q = \frac{qv}{0{,}5\psi\omega ld^2}$ — коэффициент торцевого расхода (q_v — расход жидкости);

$\psi = (D - d)/d$ — относительный зазор;

ϑ — безразмерный коэффициент нагруженности шлифовального круга;

$\Lambda = 6\mu U_0 L/p_н h_{02}$ — число сжимаемости;

$m = 12\mu M^*/\pi h_{03} p_н r_н$ — коэффициент режима в струйных течениях внутри устройств наддува;

$\sigma = 12\mu R2/h_{02} p_н t_0$ — число сдавливания;

$p = p_a / p_н$ — параметр давления;

$\chi = \frac{\omega\eta}{k}$ — безразмерный параметр, определяющий положение центра вала в области жидкостной мазки;

$S_0 = \frac{\eta\omega}{k\psi^2} = \frac{\chi}{\psi^2}$ — критерий Зоммерфельда;

$\lambda = \eta\frac{n}{k} = \frac{S_0\psi^2}{2\pi}$ — характеристика режима работы подшипника;

$N = \frac{\lambda}{\lambda_{кр}} = \frac{S_0}{S_{0кр}}$ — коэффициент надёжности подшипника;

ВВЕДЕНИЕ

Мир системен. В природе не существует обособленных систем. Любая из них является частью другой системы, которая называется надсистемой по отношению к рассматриваемой, а надсистема, в свою очередь, сама является частью другой, более крупной надсистемы. В тоже время самая малая система состоит из ряда других более мелких систем, называемых подсистемами. Системы бесконечно уходят вширь и вглубь, имея тесные связи друг с другом. Состояние системы в каждый момент времени характеризуются набором ряда переменных, а поведение системы — определённой последовательностью её состояний во времени. Любые системы обладают свойством относительной устойчивости, т.е. она сохраняется только в определённых границах изменений её переменных. Важным свойством системы является свойство внутренней целостности, которое характеризуется относительной самостоятельностью поведения и существования.

Качественное изучение инженерно-технических дисциплин невозможно без моделирования взаимодействия объектов технических систем. Превращение моделирования из метода научного познания в средство решения инженерных задач в современных условиях, находит своё выражение в государственных образовательных стандартах и нормативных документах.

Европейская федерация национальных инженерных ассоциаций, предъявляя требования к компетенции современных выпускников инженерных вузов, формулирует два из них следующим образом:

— быть способными создавать теоретические модели, позволяющие прогнозировать физические явления и использовать практически указанные модели;

— быть способным работать над многодисциплинарными объектами.

Говоря о перспективах совершенствования учебного процесса, необходимо иметь в виду, что этот процесс требует

пересмотра методик изложения изучаемой информации. Необходимо осуществить структурирование и воссоединение частей единого информационного поля, создав условия для целостного системного изложения материала цикла специальных дисциплин. Однако реализация этого условия в инженерных вузах связана с затруднениями, обусловленными следующими обстоятельствами:

— отсутствием учебной литературы, в которой эта проблема решается системно;
— нет единого, методически обоснованного подхода к реализации этих условий на различных кафедрах;
— недостаточной физико-математической подготовкой студентов младших курсов.

Технология машиностроения в системе технических дисциплин позволяет в сравнительно отчётливой и конкретной форме представить многие её аспекты в системном развитии. Приобретая навыки видеть проблему целиком с различных сторон, видеть связи между её частями, студенты приобретают навыки системного творческого мышления, которое является основой как творческой, так и любой активности в учении.

Технология машиностроения, являясь базовой дисциплиной инженерного образования, рассматривает совокупность методов проектирования, изготовления и эксплуатации технических систем. При этом теоретическая и практическая реализация этих методов основана, в первую очередь, на решении задач механики, в которых рассматривается состояние деформируемых тел непрерывно заполняющих пространство и образующих сплошную среду — континуум.

При всей общности основных положений механики в целом выявляются особенности поведения сплошной среды, требующие тщательного изучения и систематизации. К таким особенностям относятся механизмы поведения материала в зоне резания в условиях высоких давлений и температур, жидкостного трения, характер влияния смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) на процесс обработки

и качество обрабатываемых поверхностей. Для того, чтобы данные проблемы вошли в качестве объекта управления, необходимо рассматривать механику вязкоупругих материалов и материалов, которые не имеют определённой формы, а принимают её в соответствии с внешними условиями, т.е. жидких сред. Математическое описание движения жидкой среды может сопутствовать процессам и механизмам большинства технических систем технологии машиностроения, т.к. математическая модель движения сжимаемой, вязкой жидкой среды является наиболее общей моделью континуума.

В процессе такой деятельности необходимо развивать системное многоэкранное инженерное мышление, обеспечить научно-педагогические условия для целенаправленного овладения студентами основами методологии инженерного творчества и компьютерной интеллектуальной поддержкой. Учебное пособие реализует поставленную задачу путём развития и формирования структуры творческого инженерного мышления. Процесс учебно-познавательной поисковой деятельности по формированию структуры материала организуется поэтапно:

— овладение основами методологии инженерного творчества на базе интеллектуальной активности, положительного мотивационного и эмоционального фона, развития системного многоэкранного инженерного мышления;
— выявление и изучение «ядра» учебной информации при помощи математического моделирования объекта изучения, структурирования и её ориентации на общую учебную проблему;
— реализации модельных расчётов технических систем и компьютерная интеллектуальная поддержка [11].

ГЛАВА 1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ

1.1 СИСТЕМНОСТЬ — ОСНОВА ИНЖЕНЕРНОГО МЫШЛЕНИЯ

В современных экономических условиях предприятиям необходимо кардинально менять свою стратегию, направляя её на создание конкурентноспособных по цене, качеству и уникальности изделий. Реализация такой стратегии должна проводиться на основе принципиально новых технических решений, новейших открытий и изобретений. Научные исследования становятся решающими факторами развития производства. Эта тенденция вызывает необходимость по-новому взглянуть на сложившуюся систему производства машиностроительных изделий. Пришло время системного подхода в организации современных производств, реализацию которого можно осуществить путём перехода на другой уровень абстракции в представлении изделия и его деталей.

Любое изделие представляет собой техническую систему, описываемую совокупностью элементов, отношение к которым зависит от того, с каких позиций рассматривать изделие. Изделие можно рассматривать как объект эксплуатации или производства. Любые технические системы не вечны: они переживают периоды становления, расцвета, упадка и, наконец, сменяются другими системами. Такое развитие ТС можно отобразить в виде S-образной кривой. Эволюция технической системы изготовления машиностроительного изделия изображена на рисунке 1.1.

По оси абсцисс откладывается время (t) «жизненного цикла ТС». По оси ординат — интегрированный показатель (N), отражающий уровень развития и эффективности технической системы.

Вначале своего развития (участок I) система развивается медленно. Это период зарождения технологии машиностроения

как науки. В этот период впервые научно обобщается опыт развития технологии металлообработки. (на диаграмме зона *Ds*).

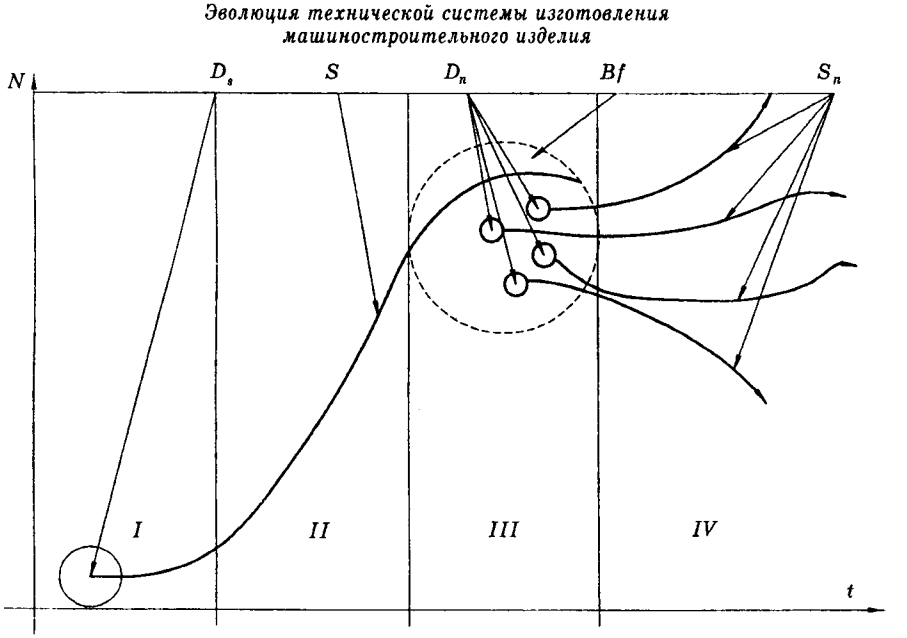


Рис. 1.1 Эволюция технической системы изготовления машиностроительного изделия

В связи с бурным развитием техники в начале XX века возникла необходимость обобщения опыта по разработке и осуществлению технологических процессов. Начался период интенсивного развития технической системы (II — участок кривой). Технология машиностроения стала формироваться как отрасль науки на основе обобщения результатов большого труда коллективов заводов, научно-исследовательских институтов, высших учебных заведений и работников науки и промышленности. Основы технологии машиностроения были созданы, главным образом, трудами советских учёных: Б.С. Балакшина, Н.А. Бородачева, К.В. Вотинова, В.И. Дементьева,

Ф.С. Деменьюка, М.Е. Егорова, А.А. Зыкова, А.И. Каширина, В.М. Кована, В.С. Корсакова, А.А. Маталина, С.П. Митрофанова, Э.Б. Рыжова, Э.А. Сателя, А.П. Соколовского, Д.В. Чарнко, А.Б. Яхина и многих других.

По мере развития машиностроения, дальнейшего изучения технологии стали выявляться общие закономерности, появились широкие обобщения, справедливые для различных отраслей машиностроения. Постепенное накопление данных эмпирических исследований технологических процессов, выявление отдельных фактов, связей между явлениями, выдвижение различных идей и гипотез позволило сформировать технологию как науку. На этой основе создано учение о точности обработки деталей, раскрыты закономерности размерных и временных связей технологических процессов, разработаны расчётные методы, сформулирована система основных понятий и определений, создана методика разработки технологических процессов изготовления изделий.

В итоге были сформированы такие технологические дисциплины как основы технологии машиностроения, конструирования приспособлений, проектирования машиностроительных цехов и заводов, а также автоматизация производственных процессов и ряд других.

Современное машиностроение используется практически во всех сферах человеческой деятельности, достигло огромных успехов в повышении её эффективности и в итоге превратилось в технологическую базу промышленности, определяющую уровень технического развития страны и её безопасности. Производство изделий в значительной степени стало массовым, крупносерийным, ориентированным на рынки большой ёмкости и на изделия массового спроса. Развитие технической системы подходит к своему максимуму (III участок кривой).

Развитие машиностроения ставит новые проблемы, связанные с повышением качества изделий, производительности труда и требует их разрешения. Прошли времена, когда предприятие могло выпускать одну и ту же продукцию деся-

тилетиями. Сегодня в самых современных отраслях промышленности (например, в электронике) жизненный цикл изделия сокращается до нескольких месяцев. Если же говорить о машиностроении, то в нём в среднем за три-пять лет необходимы полная замена выпускаемых изделий и смена средств технологического обеспечения (технологических процессов, оборудования, оснастки).

Таким образом, чётко видна тенденция сокращения жизненного цикла изделия, обусловленная стремлением производителей быстрее и максимально полнее удовлетворять потребности общества, что, в свою очередь, стимулирует рост этих потребностей. Непрерывно растущие потребности общества порождают рост разнообразия машиностроительных изделий, их назначения. Необходимость выпуска конкурентоспособной продукции усиливает эту тенденцию и требует непрерывного совершенствования технологических процессов и средств технологического оснащения. Современное предприятие должно быть способным быстро переходить на выпуск новых изделий повышенного качества с минимальными издержками. Сложность решения этой задачи усугубляется тем, что номенклатура выпускаемых изделий и объёмы серий в определённой степени являются непредсказуемыми. Работа современного предприятия в динамично изменяющихся условиях должна решать «взаимоисключающие» задачи: быстро переходить на выпуск новой продукции и одновременно внедрять новые технологии и технику; повышать качество изделий и снижать издержки производства.

Возникает проблема, заключающаяся в том, что технолог в современных условиях должен выполнять в единицу времени не только больший объём работ, но и делать её на более качественном уровне. Решение этих проблем требует новых подходов, т.к. традиционные виды технологической проработки уже не удовлетворяют требованиям производства. Назрела острая необходимость поиска нового вида технологического оснащения, позволяющей существенно снизить сроки технологической подготовки производства и поднять ее эффектив-

ность. На основании закона развития технических систем можно прогнозировать замедление темпов её развития. ТС постепенно подойдёт к точке перегиба кривой, за которой исчерпывают себя традиционные принципы, положенные в её основу. На диаграмме зона *Bf*. В этой зоне техническая система подходит к точке бифуркаций (Bifurcus-раздвоение).

Дальнейшие пути развития системы, имеющие в своей основе качественно новые подходы и принципы (*Dn* — зоны зарождения новых направлений развития ТС), разбиваются на равновозможные ветви (*Sn*). Какой путь развития технической системы будет реализован зависит от многих факторов, в число которых не последним входит состояние и уровень учебно-методической и научно-исследовательской деятельности кафедр наших вузов. Именно будущие специалисты должны осуществлять дальнейшие исследования, прогнозирование и разработку возможных направлений развития технической системы на новых принципах.

Чтобы познать закономерности создания высокоэффективных технических объектов и технологий необходимо обладать и развивать «сильное» многоэкранное мышление, основанное на системном анализе. Приобретая навыки видения проблемы целиком с различных сторон, видеть связи между её частями, студенты приобретают навыки системного творческого мышления, которое является основой как творческой, так и любой активности в учении.

Отсюда глобальная задача технического вуза — формирование у студентов системного творческого инженерного мышления. В переводе с латинского инженер — это изобретатель, творец новой техники. Принимая это как тезис, деятельность инженера можно рассматривать как творческую деятельность, как инженерное творчество. Необходимо развивать способности сознательно, целенаправленно генерировать нестандартные технические идеи, овладевать методологией творчества с тем, чтобы оптимально использовать базу общенаучных и специально-профессиональных знаний в области машиностроения, технологии и конструирования машин.

Использование методики многоэкранного системного анализа позволяет раскрыть самые разнообразные стороны изучаемой дисциплины. Одним из действенных методов системного анализа является системный оператор (СО). В приложении 1 в качестве примера приведён СО технической системы — «обрабатывающий центр ».

Системный оператор (СО) — это психологический метод развития системного мышления и творческого воображения, основанный на системном, диалектическом и функционально-динамическом подходах к исследуемому объекту с целью выявления и прогнозирования путей его развития и совершенствования [11].

Система — это комплекс организованных в пространстве и времени взаимосвязанных элементов, необходимых и достаточных для выполнения требуемой функции, которую определяет человек.

Общее описание процедуры многоэкранного системного анализа заключается в следующем:

— выбирается прототип, объект анализа;

— проводится системный анализ объекта по трём осям: *компонентная ось* СО — это структура, то из чего состоят системы, из каких подсистем, каждая подсистема в свою очередь состоит из подсистем и т.д., каждая система является частью нескольких надсистем, которые в свою очередь входят в надсистемы и т.д.; *генетическая ось* СО — это движение и развитие системы во времени, у каждой системы есть прошлое, настоящее и будущее, а у прошлого и будущего — ещё более глубокое прошлое и будущее; *функциональная ось* СО — это основа анализа развития системы, которая определяет для каждой системы её функциональное назначение.

Использование многоэкранного представления различных аспектов науки и, в частности, определения места, роли и перспектив развития изучаемой дисциплины, с помощью системного оператора (СО), позволяет развивать системное и нагляд-

но-образное мышление, основное условие для глубокого понимания учебного материала и выхода в творческую сферу.

В качестве примера самостоятельной работы предлагается освоить метод развития системного мышления и творческого воображения на основе системного оператора.

На рисунке 1.2 представлена Схема Системного оператора.

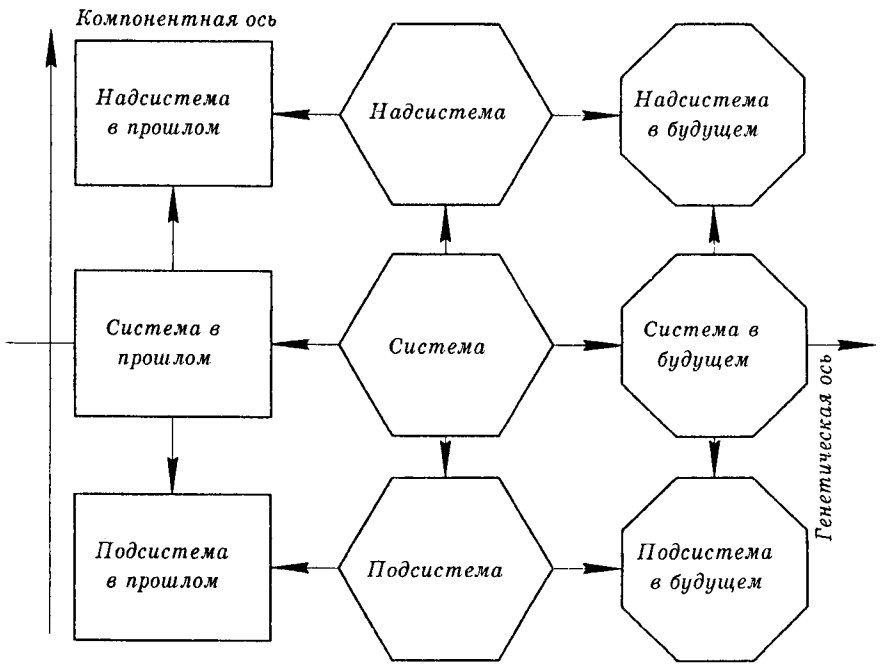


Рис. 1.2 Схема системного оператора

Схема включает в себя элементарную ячейку СО, из 9-ти экранов. В действительности количество экранов бесконечно по всем осям. Для экранов системы в будущем эффективно использование метода «идеальный конечный результат — ИКР (системы нет, а её функция выполняется). Здесь открываются большие возможности для творческого мышления и воображения, смелых решений и интересных фантастических проектов.

Достоинства метода многоэкранного системного анализа состоят в следующем:

— выступает в роли инструмента для генерирования новых идей;
— является средством развития системного мышления;
— позволяет преодолеть психологический барьер инертного мышления, стимулирует развитие последовательных мыслительных действий в области нестандартных идей, ситуаций, проблемных заданий.

1.2 ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОНЯТИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

В общей теории систем для рассмотрения основных задач системного подхода используются следующие определения и понятия.

Техническая система (*ТС*) — совокупность элементов техногенной деятельности человека, которые могут рассматриваться как системы, а сама исследуемая система — как один из элементов более широкой системы.

Для отображения процесса развития и эволюционирования технических систем используется *интегрированный показатель*. Интегрированный показатель характеризует уровень развития ТС и отражает свойства, присущие системе в целом, но не свойственные ни одному из её элементов в отдельности. Отсюда следует важный вывод: система не сводится к простой совокупности элементов и, расчленяя систему на отдельные части, изучая каждую из них в отдельности, нельзя познать все свойства системы в целом. Важным свойством любых систем является наличие существенных связей между элементами, превосходящих по мощности (силе) связи этих элементов с элементами, не входящими в данную систему. Указанное свойство позволяет выделить систему в виде целостного объекта из окружающей среды.

Изучение любой системы предполагает создание модели системы, позволяющей предсказать её поведение в определённом диапазоне условий. Модель — описание системы,

отображающее определённую группу её свойств; углубление описания — детализация модели. Процесс построения и изучения моделей реально существующих объектов машиностроения называют моделированием.

Описание системы можно рассматривать с трёх точек зрения: функциональной, морфологической, информационной.

Функциональное описание необходимо для осознания важности системы, определения её места, оценки отношения к другим системам и к внешней среде. Для построения общего функционального описания системы вводятся следующие понятия. *Состояние* — множество существенных свойств, которыми система обладает в данный момент времени. *Внешняя среда* — множество элементов, которые не входят в систему, но изменение их состояния вызывает изменение состояния системы. *Модель функционирования* (поведения) системы — модель, предсказывающая изменение состояния системы во времени.

Морфологическое описание должно дать представление о строении системы. Оно не может быть исчерпывающим; глубина описания, уровень детализации, т.е. выбор элементов, внутрь которых описание не проникает, определяется назначением системы и целью исследования. Изучение морфологии начинается с элементного состава. Под элементом в данном случае понимается подсистема, внутрь которой описание не проникает. Морфологические свойства системы существенно зависят от характера связей. Обычно выделяют информационные, энергетические, вещественные связи. Информационные связи предназначены для переноса информации, энергетические — для переноса энергии между элементами, вещественные — для передачи материала, изменения свойств материала. В результате морфологического описания возникает понятие структуры. *Структура* — совокупность элементов и связей между ними.

Информационное описание системы должно давать представление об организации системы. Оно определяет зависимость морфологических и функциональных свойств системы

от качества и количества внутренней (о себе самой и среде) и внешней (поступающей из среды) информации.

Системный подход — это направление научного познания и социальной практики, в основе которого лежит исследование объектов как систем. Методологическая специфика системного подхода определяется тем, что ориентирует исследование на раскрытие целостности объекта и обеспечивающих её механизмов, на выявление многообразных типов связей сложного объекта и сведение их в единую теоретическую картину. Для создания сложных систем нужен определённый идеологический и организационный план проектирования системы, пронизывающий весь процесс проектирования, начиная от фазы исследовательской проработки до фазы изготовления, испытаний и применения опытного образца. Необходимость системного подхода при создании систем объясняется тем, что темпы развития науки и производства с каждым днём увеличиваются, сложность систем возрастает, а это увеличивает длительность разработки, в результате чего большинство систем к моменту ввода их в эксплуатацию могут оказаться морально устаревшими, а иногда и просто ненужными. Проектирование подобных систем требует больших капиталовложений, в результате чего требуются гарантии, что будет создана система с нужными свойствами. Отсюда выявляется основное целевое назначение системного подхода к проектированию — сокращение периода проектирования системы между моментом возникновения потребности в создании подобной системы и моментом ввода её в эксплуатацию при сохранении соответствия качества выполняемых функций, требуемых для достижения поставленных целей.

Необходимость конструирования современных систем привела к активному использованию системного подхода в технике, в результате чего появилась новая научно-техническая дисциплина *«системотехника»*, охватывающая вопросы проектирования сложных систем.

Термин «системотехника» используется для описания обобщённого подхода к проектированию систем, конструируемых

для решения различных задач, при условии, что эти задачи будут решаться наиболее эффективным из всех возможных способов, причём каждый элемент системы будет рассматриваться не сам по себе, а во взаимодействии с другими элементами.

Можно выделить следующие задачи, решаемые на основе системотехнического подхода:

— определение общей структуры системы;
— организация взаимодействия между подсистемами и элементами;
— учёт влияния внешней среды;
— выбор оптимальной структуры;
— выбор оптимальных алгоритмов функционирования.

Проектирование технических систем состоит из двух стадий.

Первая стадия проектирования ТС — макропроектирование (внешнее проектирование), в процессе которого решаются функционально-структурные вопросы системы в целом. Макропроектирование начинается с формулировки проблемы, которая состоит из трёх составляющих: 1 — определение целей создания системы и круга решаемых ею задач; 2 — описание действующих на систему факторов, подлежащих обязательному учёту при разработке; 3 — выбор показателя или системы показателей эффективности системы.

Вторая стадия проектирования ТС — микропроектирование (внутреннее проектирование), связанное с разработкой элементов системы как физических единиц оборудования и с получением технических решений по основным элементам (их конструкции и параметры, режимы эксплуатации).

Процесс проектирования ТС в целом достаточно консервативен. Этот консерватизм играет свою положительную роль, не «пропуская» необоснованные, популистские нововведения. Тем не менее, с позиций современных достижений науки возможен свежий взгляд на классические теории, принципы и методы в машиностроении.

Одним из таких взглядов может стать синергетический подход, которой позволяет по-новому подойти к проблемам технологии машиностроения.

Синергетика предлагает вместо аналитических построений заняться поиском общих закономерностей в разнообразных явлениях. Об успехе такого подхода свидетельствует то, что дисциплина, возникшая как отрасль физики, теперь находит свои приложения в биологии, социологии, психологии, изучении развития науки и философии вообще. Говорят о применении синергетики в теории искусства. Итак, уже можно сказать о появлении жизнеспособной новой парадигмы. Ей ещё нет полувека, но результаты исследований, основанных на ней, уже приносят практическую пользу.

В чём состоят методические обоснования использования синергетического подхода?

Во-первых, синергетика направляет своё внимание, по словам И. Пригожина, не на существующее, а на возникающее. Ей интересны моменты возникновения из хаоса порядка. Для этого она исследует несколько типов хаоса (равновесный хаос, динамический хаос, неравномерный, турбулентный и статистический хаос) и специально вводит термин «бифуркация» как точку ветвления, когда открываются несколько возможных путей развития и нет ничего предопределённого. Тем самым усиливается отход от классической модели бытия, поскольку неоклассическая картина тоже суживает границы классического детерминизма (причина-следствие), но оставляет возможность действия статистических законов. Постнеоклассическая наука, опираясь на результаты синергетики, теории диссипативных структур суживает ещё больше действие статистических законов, поскольку по её мнению, в нестабильном, неравновесном состоянии «малые воздействия могут привести к большим следствиям». Это принципиальное значительной методологической значимости положение, ибо мир теряет некий выделенный центр.

Оказывается, что в мире нет тех универсальных законов, которые делали возможным его познание в классическом

смысле. Ведь именно универсальность причинно-следственных связей служила ведущим представителям эпохи Просвещения онтологическим основанием возможности победы разума, всеобщности рациональности. Теперь подобные суждения ставятся под вопрос. Итак, идея о том, что мир не имеет центра и в мире нет единых универсальных причинных цепей, связывающих всё сущее — претендует на радикальную переоценку ценностей не только в науке, но и в области философии.

Во-вторых, синергетика смотрит на мир из «другой системы координат», чем предшествующая наука, поскольку она принимает за исходное нестабильность, неравновесность, нелинейность, тогда как линейность, стабильность, равновесность оказываются моментами этой нестабильности и неравномерности. Тем самым категориальная сетка, с позиций которой видится мир в новой постнеклассической теории, принципиально иная, поскольку её базовыми исходными понятиями выступают такие категории, как нелинейность, самоорганизация, открытость, сложность, бифуркация, когерентность, аттрактор, хаос, случайность и другие. Уже одно перечисление базовых, системообразующих понятий данной научной области свидетельствует о её принципиальном отличии не только от классической картины мира, но и неклассической.

Одно из направлений поиска новых форм организации технологических процессов лежит в автоматизации труда технолога. Его осуществление требует дальнейшего развития научных основ технологии машиностроения и должно идти в направлении более широкого изучения закономерностей технологических процессов, повышения уровня обобщений, формализации результатов исследований, применения математических методов, совершенствования методов расчёта и разработки технологических процессов, проектирования средств технологического оснащения, методов организации технологической подготовки производства.

Перспективным в этом отношении является новая концепция проектирования технологии — *модульная техноло-*

гия [2]. Она базируется на сквозном применении модульного принципа в конструкторско-технологической подготовке производства, когда изделие представляется совокупностью модулей, а под изготовление этих модулей разрабатываются модули технологического процесса. Для осуществление последних создаются, соответственно, модули технологического оборудования и оснастки.

Такой подход позволяет на каждом предприятии организовывать на модульном уровне современную элементную базу прогрессивных технологических процессов, оборудования и оснастки и из них методом компоновки строить технологические системы производства изделий. Идея типизации реализуется на уровне модулей технологического процесса и так же, как и при групповой технологии, изделия объединяются в группы по общности в них модулей, но (в отличие от групповой технологии) в этом случае не возникает трудностей в группировании изделий.

Получаемый *модульный технологический процесс* объединяет в себе достоинства единичной, типовой и групповой технологий, поскольку учитывает все особенности конкретного изделия так же, как и единичный процесс. При этом максимально эффективно могут использоваться принцип агрегатирования при конструировании и принцип кооперации при производстве качественных изделий [2]. Примером может служить система развития мирового и отечественного автомобилестроения.

Отметим момент, связанный с иерархией масштабов коэволюционирующих уровней развития ТС в машиностроении. Для этого условно примем в качестве микроуровня повседневную учебно-методическую и научно-исследовательскую деятельности кафедр инженерных вузов; к макроуровню отнесём деятельность научных учреждений, фирм и коорпораций; к мегауровню — долгосрочное эволюционирование глобального (мирового) промышленно-экономического сообщества.

В соответствии со вторым принципом синергетики [4] точка бифуркации является протяжённой во времени областью

кризиса (перестройки) для микроуровня и мгновением для макро- и мегауровня. В этой зоне возникает прямой контакт микро- и мегауровней в результате которого рождается макроуровень с иными качествами.

На основании синергетических принципов Становления, процесс рождения параметров новых структур представляется в виде креативной триады [4]:

«управляющие сверхмедленные параметры верхнего мегауровня + короткоживущие переменные низшего микроуровня = параметры порядка, структурообразующие долгоживущие переменные макроуровня».

Вывод: в построении и определении дальнейшего пути развития технических систем машиностроения должно принять участие всё сообщество машиностроителей, так как её будущее зависит от того, какие новации и теории получат развитие и реализацию в глобальном промышленно-экономическом сообществе.

Технология машиностроения — предмет широкого познавательного диапазона, использующий комплекс научных подходов в исследовании и познании мира. Качественное изучение данной дисциплины предполагает широкое использование различных методов моделирования в процессе учебно-поисковой деятельности по аналогии с активной творческой поисковой деятельностью учёного-исследователя. Овладение этими методами — главная задача обучающегося.

1.3 ВИДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Физическое моделирование

Модель — это такой материальный или абстрактный объект, который в процессе изучения замещает объект-оригинал, сохраняя наиболее важные для данного исследования свойства последнего.

Существующие физические методы моделирования заключаются в замене реальных объектов или процессов их моделями, представляющими собой средства отображения и

воспроизведения той или иной части действительности с целью её более глубокого познания. Например, модели можно классифицировать по способу построения и содержанию.

На основе этой классификации строятся классификации по признакам адекватности моделей и процессов. В этом плане считается, что моделирование может быть полным, неполным и приближённым. Модели могут иметь обязательное геометрическое подобие (макеты машин, компоновки расположения оборудования в цехах и т.д.) или реализовывать динамику процессов и структур. В этом случае основой является физическое подобие модели и оригинала, которое заключается в сходстве их физической природы.

В моделировании применяются различные способы определения механического или физического подобия. Считается, что два явления подобны, если по заданным характеристикам одного можно получить характеристики другого простым пересчётом, который аналогичен переходу от одной системы единиц измерения к другой. В таком случае необходимо рассчитать «переходные масштабы».

Основу теории подобия и моделирования физических явлений составляют: *первая теорема* подобия (Ньютона-Бертрана), доказывающая, что у подобных явлений коэффициенты подобия равны единице или одному и тому же числу, а число критериев подобия должно быть меньше числа членов уравнения на единицу; *вторая теорема* (р-теорема), позволяющая считать, что у подобных явлений критерии моделирования одинаковы; *третья теорема* подобия (Кирпичева-Гухмана), утверждающая, что подобны между собой те явления, которые имеют подобные условия однозначности (геометрические характеристики, параметры, условия) и одинаковые критерии подобия.

Математическое моделирование

Математическое моделирование можно определить как деятельность по созданию и исследованию математическими средствами моделей различных конструкций и явлений.

Математическое моделирование — это способ исследования процессов и явлений, имеющих разную природу, но описываемых одинаково с точки зрения математики, т.е. одинаковыми математическими соотношениями. Этот вид моделирования обладает большими возможностями по сравнению с физическим моделированием.

Математическая модель описывает наиболее характерные явления. Она в своей первооснове может и не содержать в явном виде искомых величин, но её надо преобразовать в такую систему соотношений, которая позволит получить аналитические решения. Под решением понимаем получение явных функций для искомых величин.

Необходимо различать модели, относящиеся к детерминистским от статистических. Классические законы механики имеют детерминистскую природу. При статистическом моделировании искомые величины представляются вероятностными характеристиками какого-либо случайного явления, которое моделируется, а нужные характеристики определяют путём статистической обработки наблюдений. Математическое моделирование может выполнять следующие функции:

— обучать использованию математического аппарата, прежде всего, как языка для описания физических явлений в качестве одного из методов исследования;
— связывать качественные свойства исследуемых объектов с аналогами в других областях науки, описываемых аналогичными системами уравнений, с более удобными для понимания или наблюдения;
— создавать обобщённую модель объекта по результатам изучения отдельных сторон оригинала на базе математической модели, отражающей свойства рассматриваемого объекта, обеспечивать приведение частных фактов, событий, свойств в стройную систему знаний;
— замещать объект изучения его моделью путём перехода к безразмерным параметрам в системах уравнений,

описывающих свойства объекта, и судить о реальных объектах на основании анализа результатов экспериментов, полученных на моделях;

— обучать приёмам мышления (анализа, синтеза, использованию аналогий, абстрагирований и т.д.), способствуя формированию творческого подхода к изучению явлений и систем;

— способствовать обеспечению более тесной связи науки и образования [10].

Анализ сложных многокомпонентных систем с использованием математического моделирования был до недавнего времени затруднён из-за большого объёма вычислений и слабого оснащения научно-исследовательских организаций компьютерной техникой.

В настоящее время быстродействие компьютеров возросло многократно и существенно улучшилось программное обеспечение, что позволяет снять имевшиеся ограничения и активнее использовать в учебном процессе для решения сложных и разнообразных задач техники и технологии современные методики.

Имитационное моделирование

Появление имитационного моделирования связано с преодолением противоречий двух альтернативных методов исследования: физического и математического. Основными недостатками физического моделирования являются ограниченность области применения моделей и сложность их перенастройки. Практически для каждой новой задачи требуется создавать новую модель. Другой существенный недостаток связан с ограничением скорости проведения эксперимента.

Практическое применение математических моделей, допускающих только численное решение, было довольно ограниченным (ввиду трудоёмкости соответствующих вычислений). Ограничения, наложенные на реальные математические

модели, допускающие аналитическое решение, заставляли искусственно упрощать математическое описание исследуемых объектов, ограничивать типы воздействий и т.п. Попытки расширить класс моделей приводят к быстрому росту затрат времени и средств на разработку соответствующих методов математического анализа.

В имитационной модели сохраняется математическая форма для описания блоков модели, однако снимаются основные ограничения математической модели — упрощения, которые требовались для аналитического решения. Способ постановки эксперимента на имитационной модели соответствует эксперименту с физической моделью, однако в связи с тем, что вместо физического объекта используется машинная программа, снимается основное ограничение физических и реальных моделей — сложность перенастройки и изменения условий эксперимента.

Метод имитационного моделирования в сравнении с аналитическими методами исследования систем может показаться «грубым силовым приёмом», к которому не следует прибегать, однако он является сейчас самым распространённым для исследования и решения задач управления.

Применение имитационных моделей целесообразно в случае, если: не существует математической постановки данной задачи; аналитические решения существуют, но их реализация невозможна; осуществление наблюдения за ходом динамики процесса в течение длительного времени; постановка наблюдений и экспериментов в реальных условиях затруднена или невозможна.

Во второй главе рассмотрены некоторые математические модели технических систем машиностроения.

Контрольные вопросы

1. В чём состоит сущность закона развития технических систем?
2. Что такое системный оператор?

3. Приведите пример эволюции какой-либо технической системы машиностроения.

4. Что изучает дисциплина «системотехника»?

5. Каково назначение моделирования?

6. Раскройте сущность различных видов моделирования.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В технологии машиностроения требуется рассматривать механику вязкоупругих материалов и материалов, которые не имеют определённой формы, а принимают её в соответствии с внешними условиями, т.е. механику жидких сред. Кроме того, движения жидкой среды сопутствует большинству процессов технических систем. Поэтому математическое моделирование движения сжимаемой, вязкой жидкой среды является актуальной проблемой технологии машиностроения.

2.1 УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОЙ СРЕДЫ В НАПРЯЖЕНИЯХ

Для получения уравнений Навье-Стокса, используется второй закон Ньютона:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i \,. \qquad (2.1)$$

Для описания движения жидких сплошных сред необходимо, кроме внешней силы F, которую мы будем рассматривать как единичную массовую силу, учесть также силы, отвечающие за давление p и трение внутри жидкости.

С целью упрощения математического описания процессов движения жидкой среды, предпочтение отдано методу Эйлера, в соответствии с которым изучается движение, происходящее в некоторой точке пространства в любой момент времени. По методу Эйлера объектом изучения является не сама жидкость, а фиксированная часть пространства, характеризующаяся различными параметрами, представленными в виде векторных и скалярных полей (поле скоростей, поле ускорений). При этом, поскольку физическим законам подчиняются конкретные частицы среды, вводится понятие индивидуальной (субстанциальной) производной и местной (локальной) производной.

В соответствии со вторым законом Ньютона, с учётом вышесказанного, получаем наиболее общее уравнение движения жидкой среды — уравнение движения в напряжениях.

В векторной форме оно записывается следующим образом:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{\Phi} + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \overrightarrow{p_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overrightarrow{p_y}}{\partial y} + \frac{\partial \overrightarrow{p_z}}{\partial z}\right), \qquad (2.2)$$

где $\frac{d\vec{V}}{dt}$ — полная (субстанциальная) производная вектора скорости по времени (ускорение жидкой частицы);

$\vec{\Phi} = \vec{F}/m$ единичная массовая сила;

ρ — плотность жидкости;

$\overrightarrow{p_x}, \overrightarrow{p_y}, \overrightarrow{p_z}$ — напряжения, действующие в плоскостях, нормальных осям x, y, z декартовой системы координат.

Второе слагаемое правой части уравнения (2.2) содержит величины (параметры), природа которых определяется давлением p и внутренним трением жидкости и, будучи отнесёнными к площадкам на которых они действуют, составляют внутренние напряжения.

Субстанциальная производная от вектора скорости по времени равна полному ускорению жидкой частицы и по правилам дифференцирования сложной функции получит следующий вид:

$$\frac{\partial \vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial y}\frac{dy}{dt} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}\frac{dz}{dt}$$

или

$$\frac{\partial \vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial x}V_x + \frac{\partial \vec{V}}{\partial y}V_y + \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}V_z\right),$$

где $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$ — локальная или местная производная — это частная производная, представляющая ускорение в данной точке, возникающее в результате неустановившегося движения жидкости. Локальная составляющая обуславливается удельной силой инерции, и представляет собой изменение скорости во времени.

$\left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial x}V_x + \frac{\partial \vec{V}}{\partial y}V_y + \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}V_z\right)$ — эта сумма называется конвективной производной и представляет собой ускорение, характеризующее неравномерность движения при перемещении частиц жидкости в пространстве;

V_x, V_y, V_z, — компоненты скорости жидкой частицы.

Используя оператор Гамильтона (∇ — набла), ускорение жидкой частицы можно представить в виде:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d\vec{V}}{dt} + \left(\vec{V}\nabla\right)\vec{V}, \qquad (2.3)$$

где $\nabla = i\frac{\partial}{\partial x} + j\frac{\partial}{\partial y} + k\frac{\partial}{\partial z}$ — оператор Гамильтона.

Таким образом, субстанциальная производная равна сумме локальной и конвективной производных и характеризует удельную силу инерции жидкости.

Учитывая выражение (2.3), уравнение движения в напряжениях (2.2) в векторной форме примет следующий вид:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \left(\vec{V}\nabla\right)\vec{V} = \vec{\Phi} + \frac{1}{p}\left(\frac{\partial \overrightarrow{p_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overrightarrow{p_y}}{\partial y} + \frac{\partial \overrightarrow{p_z}}{\partial z}\right) \qquad (2.4.)$$

В проекциях на оси координат уравнение (2.4) записывается следующим образом:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x\frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y\frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z\frac{\partial V_x}{\partial z} = X + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial t}+V_x\frac{\partial V_y}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_y}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_y}{\partial z}=Y+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p_{yy}}{\partial x}+\frac{\partial p_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial p_{yz}}{\partial z}\right) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t}+V_x\frac{\partial V_z}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_z}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_z}{\partial z}=Z+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p_{zz}}{\partial x}+\frac{\partial p_{zx}}{\partial y}+\frac{\partial p_{zy}}{\partial z}\right),$$

где p_{xx}, p_{yy}, p_{zz} — проекции напряжения $\overrightarrow{p_x}, \overrightarrow{p_y}, \overrightarrow{p_z}$ на ось ox, т.е. нормальные напряжения;

$p_{xy}, p_{xz}, p_{yx}, p_{yz}, p_{zx}, p_{zy}$ — проекция напряжения $\overrightarrow{p_x}, \overrightarrow{p_y}, \overrightarrow{p_z}$ на оси oy, oz, т.е. касательные напряжения;

X, Y, Z — проекции единичной массовой силы на координатные оси.

Уравнения (2.5) обычно представляется в несколько сокращённом виде:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t}+\left(\vec{V}\nabla\right)V_x=X+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial p_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial p_{xz}}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial t}+\left(\vec{V}\nabla\right)V_y=Y+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p_{yy}}{\partial x}+\frac{\partial p_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial p_{yz}}{\partial z}\right) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t}+\left(\vec{V}\nabla\right)V_z=Y+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p_{zz}}{\partial x}+\frac{\partial p_{zx}}{\partial y}+\frac{\partial p_{zy}}{\partial z}\right)$$

Данная система уравнений (2.5 или 2.6) содержит девять неизвестных величин: V_x, V_y, V_z, p_{xx}, p_{xy}, p_{xz}, p_{yy}, p_{yz}, p_{zz}. Их число превышает число уравнений, то есть она не определена и, как правило, имеет бесконечное число решений. Для получения однозначного решения требуется привлечь дополнительные уравнения, например уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt}+\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_y}{\partial y}+\frac{\partial V_z}{\partial z}\right)=0 \quad \text{или} \quad \frac{d\ln\rho}{dt}+div\vec{V}=0, \quad (2.7)$$

где $div\vec{V} = \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right)$ — сумма частных производных от проекции вектора скорости по одноименным координатам, называется дивергенцией (расхождением) вектора. Так, для покоящейся жидкости, система (2.5 или 2.6) совместно с уравнением (2.7) имеет частные решения. Для некоторых случаев движения идеальной жидкости данная система уравнений, совместно с уравнением неразрывности, также может иметь частные решения.

2.2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЯЗКОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Система уравнений (2.5, 2.6) содержит напряжения, для определения которых необходимо использовать дополнительные связи, на основе предположения о связи напряжений движущейся жидкости со скоростями деформации. Эту связь устанавливает закон внутреннего трения Ньютона:

$$F = \mu S \frac{dV}{dx}$$

Она основывается на предположении, что сдвиг жидкости порождает в ней не только касательные, но и нормальные напряжения. Взаимосвязь между напряжениями и скоростями деформаций отобразим в виде зависимости тензора напряжений от тензора скоростей деформаций:

$$\begin{pmatrix} p_{xx} & p_{xy} & p_{xz} \\ p_{yx} & p_{yy} & p_{yz} \\ p_{zx} & p_{zy} & p_{zz} \end{pmatrix} = \left(-p + \lambda_2 div V\right) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + 2\mu T_\varepsilon , \qquad (2.8)$$

где $\begin{pmatrix} p_{xx} & p_{xy} & p_{xz} \\ p_{yx} & p_{yy} & p_{yz} \\ p_{zx} & p_{zy} & p_{zz} \end{pmatrix}$ — левая часть уравнения — матрица, которая является тензором напряжений второго ранга. Она

отражает напряжённое состояние в точке на произвольно расположенной площадке. Напряжённое состояние жидкости изображено на рисунке 2.1.

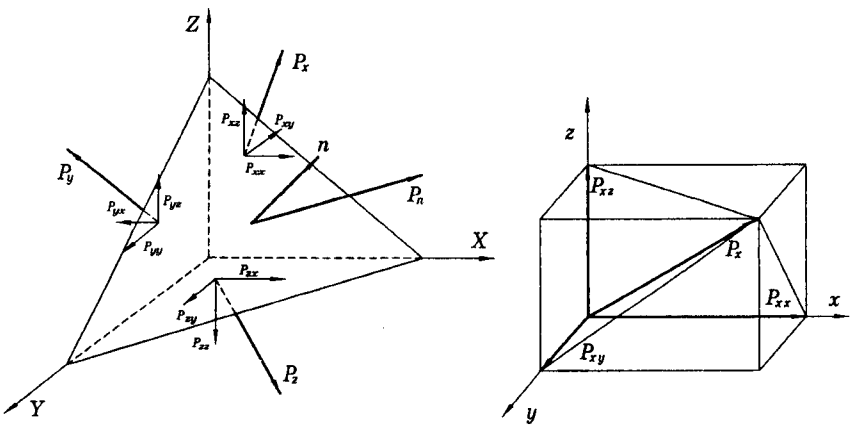


Рис. 2.1 Напряжённое состояние жидкости

На рисунке 2.1 введено следующее обозначение:

p_{xx}, p_{yy}, p_{zz}, — проекции векторов $\overrightarrow{p_x}, \overrightarrow{p_y}, \overrightarrow{p_z}$ на координатные оси (нормальные напряжения);

$p_{xy}, p_{xz}, p_{yx}, p_{yz}, p_{zx}, p_{zy}$ — проекции векторов $\overrightarrow{p_x}, \overrightarrow{p_y}, \overrightarrow{p_z}$ на координатные оси (касательные напряжения);

p — давление, которое принимают равным среднему арифметическому нормальных напряжений:

$$p = -\frac{p_{xx} + p_{yy} + p_{zz}}{3}$$

$\lambda_1 = \mu_v - 2\mu/3$ — коэффициент, связывающий объёмную (μ_v) и динамическую (μ) вязкость;

div V — дивергенция скорости (*div V* = 0 — уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости);

$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ — единичная квадратная матрица (играет роль числа 1);

$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$ — тензор скоростей деформаций. Он отражает модель движения точки жидкой среды, принадлежащей жидкой частице, которая, согласно теореме Гельмгольдца, суммируется из трёх величин:

— поступательной скорости полюса;

— скорости вращательного движения вокруг мгновенной оси, проходящей через полюс;

— скорости деформации жидкой частицы.

Отметим важное значение второй составляющей. Оно состоит в том, что именно эта составляющая характеризует вихревое движение жидкости, которое характеризуется удвоенной угловой скоростью — 2ω и обозначается через Ω, называется вихрем или ротором вектора V, то есть: $\Omega = 2\omega = 2\mathrm{rot}V$.

Скорость деформации жидкой частицы, представленная в виде тензора, отражает деформацию бесконечно малого объёма жидкой среды как результат суммарного растяжения (сжатия) вдоль координатных осей и деформации сдвига. Движение жидкой частицы паоказано на рисунке 2.2.

Соответствующие уравнению (2.8) компоненты тензора напряжений, в соответствии с правилами перемножения выражения с матрицей, определятся следующим образом:

$$p_{xx} = \left(-p + \lambda_1 \cdot div V\right) + 2\mu \frac{\partial V_x}{\partial x}, \quad p_{xy} = p_{yx} = \mu\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}\right)$$

$$p_{yy} = \left(-p + \lambda_1 \cdot div V\right) + 2\mu \frac{\partial V_y}{\partial y}, \quad p_{yz} = p_{zy} = \mu\left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y}\right) \quad (2.9)$$

$$p_{zz} = \left(-p + \lambda_1 \cdot div V\right) + 2\mu \frac{\partial V_z}{\partial z}, \quad p_{zx} = p_{xz} = \mu\left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x}\right)$$

Подставляя значения напряжений по формулам (2.9) в систему уравнений (2.5) можно получить систему уравнений для неустановившегося движения вязкой сжимаемой жидкой среды уравнения Навье-Стокса.

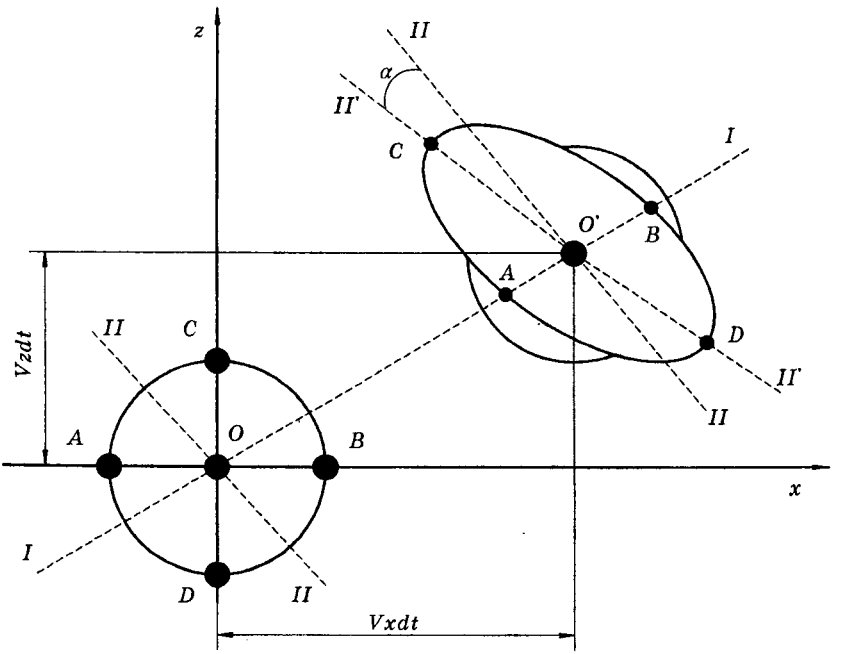


Рис. 2.2 Движение жидкой частицы: поступательное (OO'), вращательное (α) и деформационное (изменение длин отрезков AB и CD)

В векторной форме эта система запишется следующим образом:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{\Phi} + \frac{1}{\rho}\left[grad\, p + \left(\mu_V - \frac{\mu}{3}\right) grad\, div\, \vec{V}\right] + \nu \nabla^2 \vec{V}, \qquad (2.10)$$

где $\frac{d\vec{V}}{dt}$ — субстанциальная производная от вектора скорости по времени;

$\vec{\Phi}$ — единичная массовая сила;

$grad\ p$ — градиент давления (нормального напряжения) в вязкой жидкости;

выражение — $\left(\mu_V - \frac{\mu}{3}\right) grad\ div\ \vec{V}$ учитывает влияние параметров давления и скорости объёмной деформации на объёмную и динамическую вязкости;

$\nu \nabla^2 \vec{V}$ — это слагаемое отражает модель вязкой, сжимаемой, теплопроводной, ньютоновской жидкой среды, основанной на зависимости тензора напряжения от тензора скоростей деформаций (смотри формулу 2.8). Здесь:

$\nabla^2 = \Delta = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа (лапласиан).

Зависимость (2.10) представляет собой уравнение в векторной форме, которое описывает явления, происходящие в жидкой среде. Оно отражает второй закон Ньютона, применённый к фиксированной жидкой частице: *её ускорение определяется суммой массовых сил, сил давления и вязких напряжений* [18].

По мнению д.т.н. В.Ю. Тихоплава, 17 лет работавшего над проблемой механики жидкости и газа, относящейся к разрешению уравнения Навье-Стокса, уравнение Навье-Стокса по его общности, которая выражается в компактном описании бесконечно разнообразных форм движения жидкости и газов, можно сравнить со спектром видимого излучения — радугой, разноцветной дугой на небосводе. Подобно тому, как радуга описывает полный спектр красок цветной палитры всех без исключения цветных картин, которые были, есть и будут на Земле, так и уравнение Навье-Стокса с предельной общностью описывает все возможные движения жидкости и газов. Поэтому привычными алгоритмами получить решение невозможно.

Однако можно получить многочисленные решения этого уравнения в результате моделирования геометрии каждого конкретного движения жидкости и газа подобно тому, как художник моделирует геометрию окружающего мира в виде цветных картин, полученных путём нанесения в нужном месте холста нужной краски.

Давая такую обобщённую трактовку уравнения Навье-Стокса, студентам необходимо полагаться на вдумчивое и критическое отношение к учебному материалу, используя и развивая системный диалектический стиль мышления. Кроме того, следует предостеречь от проблемы, связанной с неправильным написанием формулы (2.2) в учебном пособии [26] на странице 38 под номером (5.1, *а*), а так же других ошибок и опечаток (например, стр. 24 [26]).

2.3 ЗАМКНУТЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Простейшей математической моделью реальной жидкой среды, сводящей к замкнутой системе уравнений, являются уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости с постоянным коэффициентом вязкости.

Большинство прикладных задач гидромеханики решают без учёта сжимаемости жидкости жидкой среды, которую в таких случаях называют капельной жидкостью.

Систему уравнений для движения вязкой несжимаемой жидкости получаем из уравнений (2.5) после преобразований при $\mu_V = 0$, $\mu = const$:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = X + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 V_x \\
&\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = Y + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 V_y \qquad (2.11) \\
&\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = Z + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 V_z ,
\end{aligned}$$

где $\nu = \mu/\rho$ — кинематическая вязкость;

$p = -\dfrac{(p_{xx} + p_{yy} + p_{zz})}{3}$ — давление (нормальное напряжение) в вязкой жидкости;

$\nabla^2 = \Delta = \dfrac{\partial}{\partial x^2} + \dfrac{\partial}{\partial y^2} + \dfrac{\partial}{\partial z_2}$ — оператор Лапласа (лапласиан).

Система уравнений (2.11) вместе с уравнением неразрывности (2.12), которое для частного случая несжимаемой жидкости выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \qquad \text{или} \qquad div\vec{V} = 0, \qquad (2.12)$$

будет являться замкнутой (четыре уравнения и четыре неизвестных — V_x, V_y, V_z, p). Вместе с граничными и начальными условиями это позволяет получить решение конкретной задачи. Причём, для плоского случая доказано существование и единственность решения системы (2.11)-(2.12), а для пространственного течения такая теорема не доказана.

В векторной форме уравнение Навье-Стокса записывается следующим образом:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{\Phi} - \frac{1}{\rho} grad\, p + \nu \nabla^2 \vec{V} \qquad (2.13)$$

Уравнения движения Навье-Стокса справедливы лишь для ламинарного режима течения. При турбулентном режиме течения локальную скорость можно представить в виде суммы осреднённой во времени скорости и пульсации скорости:

$$V_{мг} = V_{оср} + V_{пульс},$$

где $V_{мг}$ — мгновенное значение скорости;

$V_{оср}$ — осреднённое значение скорости;

$V_{пульс}$ — пульсация скорости.

Наличие пульсаций скорости приводит к появлению дополнительных поверхностных напряжений. По своей сути турбулентное движение является неустановившимся, поскольку скорости изменяются во времени. Осреднённое по времени турбулентное движение можно считать *установившимся*, если для разных моментов времени осреднённые значения каждой составляющей проекции скорости получаются одинаковыми. Данный подход к описанию турбулентного движения впервые применил О. Рейнольдс. На его основе были выведены уравнения гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости при наличии турбулентности.

Таким образом, в турбулентном потоке (кроме вязкостных поверхностных сил) надо учитывать дополнительные — турбулентные, обусловленные наличием пульсаций. Уравнение движения примет тогда следующий вид:

$$\frac{\partial \overrightarrow{V_x}}{\partial t} + \vec{V}_x \frac{\partial \overrightarrow{V_x}}{\partial x} + \vec{V}_y \frac{\partial \overrightarrow{V_x}}{\partial y} + \vec{V}_z \frac{\partial \overrightarrow{V_x}}{\partial z} =$$

$$= X + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \overrightarrow{p}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \vec{V}_x - \left[\frac{\partial \overrightarrow{V_x'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overrightarrow{V_x' V_y'}}{\partial y} + \frac{\partial \overrightarrow{V_x' V_z'}}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial \overrightarrow{V_y}}{\partial t} + \vec{V}_x \frac{\partial \overrightarrow{V_y}}{\partial x} + \vec{V}_y \frac{\partial \overrightarrow{V_y}}{\partial y} + \vec{V}_z \frac{\partial \overrightarrow{V_y}}{\partial z} =$$

$$= Y + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \overrightarrow{p}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \vec{V}_y - \left[\frac{\partial \overrightarrow{V_x' V_y'}}{\partial x} + \frac{\partial \overrightarrow{V_y'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overrightarrow{V_y' V_z'}}{\partial z} \right] \qquad (2.14)$$

$$\frac{\partial \overrightarrow{V_z}}{\partial t} + V_x \frac{\partial \overrightarrow{V_z}}{\partial x} + V_y \frac{\partial \overrightarrow{V_z}}{\partial y} + V_z \frac{\partial \overrightarrow{V_z}}{\partial z} =$$

$$= Z + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \vec{p}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \vec{V}_z - \left[\frac{\partial \overrightarrow{V_x' V_z'}}{\partial x} + \frac{\partial \overrightarrow{V_y' V_z'}}{\partial y} + \frac{\partial \overrightarrow{V_z'^2}}{\partial z} \right]$$

Систему уравнений (2.14) осреднённого турбулентного движения несжимаемой жидкости вместе с уравнениями неразрывности (2.12) называют *уравнениями О. Рейнольдса.* Во второй части пособия эти уравнения используются в криволинейных (цилиндрических) координатах более удобных для анализа рассматриваемых случаев.

Отличие уравнений Рейнольдса (2.14) от уравнений Навье-Стокса (2.11) состоит в появлении дополнительных членов, которые отождествляются с турбулентными напряжениями, возникающими в потоке из-за пульсаций скорости. Уравнения Рейнольдса образуют незамкнутую систему. Задача замыкания имеет много решений, но ни одно из них не является в настоящее время исчерпывающим проблему.

Одной из первых гипотез, предложенных Буссинеском, являлась гипотеза кажущейся турбулентной вязкости. Турбулентная вязкость не является свойством жидкости, а определяется кинематическими характеристиками турбулентного течения и его предыстории. В настоящее время имеется множество полуэмпирических теорий для определений кажущейся турбулентной вязкости. При таком подходе в вычисленном плане задачи для ламинарного и турбулентного режимов течения становятся идентичными, но при турбулентном течении появляется блок (и соответствующая подпрограмма) для вычисления кажущейся вязкости. Величина турбулентной вязкости может на несколько порядков превышать величину физической вязкости. Это наглядно подтверждает крылатая фраза, бытующая в кругу специалистов о том, что турбулентная вязкость воды равна вязкости ламинарного меда [26].

2.3.1 Математические модели движения вязкой несжимаемой жидкости в круглых трубах

Для практического приложения наибольший интерес представляют решения для установившегося движения вязкой несжимаемой жидкости в круглых трубах.

Этот вид движения соответствует течению жидкости, когда профили скоростей в каждом сечении трубы одинаковы, а линии тока будем считать прямыми, параллельными оси трубы, совпадающие с осью z. На рисунке 2.3 показана схема установившегося движения в цилиндрической трубе и профиль скоростей.

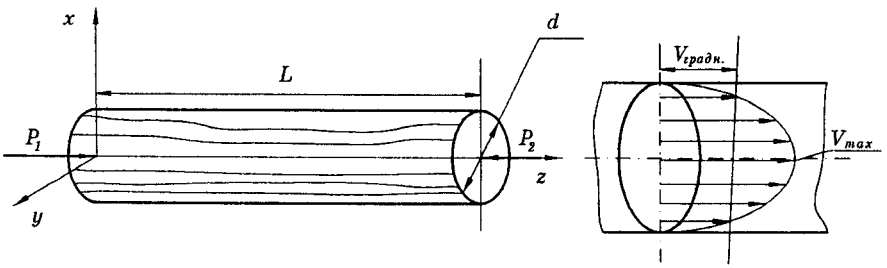


Рис. 2.3 Установившееся движение в цилиндрической трубе и профиль скоростей

С учётом вышеуказанных частностей система (2.11-2.12) сведётся к следующей:

$$0 = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}; \quad 0 = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y};$$

$$0 = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu\left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2}\right). \qquad (2.15)$$

В рассматриваемом примере давление, есть функция только переменной z, а компонента скорости V_z — функция переменных x, y. После умножения третьего выражения на ρ математическая модель рассматриваемой гидродинамической задачи будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\Delta p}{l} = \mu\left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2}\right). \qquad (2.16)$$

Левая часть этого уравнения является функцией z, а правая — x и y, и они равны некоторой постоянной. Для трубы с эллиптическим сечением решение надо искать в следующем виде:

$$V_z = A\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right),$$

где $1 = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$ — уравнение эллипса;

A — постоянная величина;

V_z — продольная скорость.

Подставляя V_z в уравнение (2.16), найдём постоянную A.

$$A = V_{z\,max} = \frac{\Delta p}{2\mu l} \cdot \frac{a^2 b^2}{a^2 + b^2}.$$

Расход, проходящий через произвольное поперечное сечение:

$$Q = \iint V_z \, dxdy = V_{z\,max} \iint \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right) dxdy = \frac{\pi a^3 b^3 \Delta p}{4\mu l\left(a^2 + b^2\right)}.$$

Формула (2.16) позволяет определить расход для эллиптической трубы с полуосями a и b.

Для трубы круглого сечения $a = b = r = d/2$, расход определится следующим образом:

$$Q = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128\mu l}. \qquad (2.17)$$

Из формулы (2.17) устанавливаем зависимость потерь давления или напора:

$$\Delta p = \frac{64\nu}{Vd} \frac{l}{d} \rho \frac{V^2}{2} = \lambda_{mp} \frac{l}{d} \rho \frac{V^2}{2}.$$

тогда $$h_{mp} = \lambda_{mp} \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \qquad (2.18)$$

где $\lambda_{mp} = \frac{64}{Re}$ — коэффициент гидравлического трения,

$Re = \frac{Vd}{\nu}$ — число Рейнольдса.

Выражение 2.18 носит название формулы Дарси-Вейсбаха. Эта зависимость широко используется на практике для расчётов потерь по длине в трубопроводах.

2.3.2 Математические модели движения вязкой несжимаемой жидкости в тонких слоях

Важное практическое значение имеет модель плоского течения в тонком слабоискривлённом слое, когда размер области течения и скорость в одном направлении много меньше размеров и скорости в другом направлении.

Введя безразмерные критерии подобия: число Рейнольдса $Re = \frac{Vd}{\nu}$, число Эйлера $Eu = \frac{p}{\rho V^2}$. Если $Re \sim \frac{1}{\varepsilon}$ и $Eu \sim \frac{1}{\varepsilon}$, то из уравнений (2.11-2.12) получим следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0. \qquad (2.19)$$

Если элемент верхней плоскости с координатами $x = \pm a$, параллельный оси x, перемещается вертикально вниз вдоль оси y со скоростью $V = \frac{\partial h}{\partial t}$, то граничные условия будут:

$x = \pm a, \quad y = 0, \quad V_x = 0, \quad V_y = 0,$

$p = p_0, \quad y = h, \quad V_x = 0, \quad V_y = -V.$

Решение для проекций скоростей и давления примет следующий вид

$$V_x = \frac{1}{2\mu}\frac{\partial p}{\partial x} y(y-h) = -\frac{6V}{h^3} xy(y-h), \qquad (2.20)$$

$$V_y = \frac{6V}{h^3}\left(\frac{y^3}{3} - \frac{y^2 h}{2}\right), \qquad (2.21)$$

$$p = p_0 = \frac{6V_\mu}{h^3}\left(a^2 - x^2\right). \qquad (2.22)$$

Силы, действующие на конкретные виды площадок, определятся из формулы (2.22):

для прямоугольной площадки с размерами $2a$ и b

$$P = \frac{8V\mu a^3 b}{h^3}, \qquad (2.23)$$

для круглой площадки с диаметром $d=2a$

$$P = \frac{2}{3}\pi\mu V\frac{a^4}{h^3}. \qquad (2.24)$$

Математические модели движения жидкости (2.20-2.22) могут использоваться для описания работы опорного подшипника или процесса прессования.

Примером ламинарного движения жидкости в кольцевом зазоре является подшипник скольжения жидкостного трения (рис. 2.4).

За счёт вращения цапфы и прилипания к ней поверхности жидкости образуется гидравлический клин. Математическая модель подшипника скольжения жидкостного трения в плоском клиновом слое описана в учебной литературе [5, 20], но она некорректно описывает реальную картину из-за непостоянства величины зазора и более сложного движения жидкости в подшипнике.

В результате совместного решения шести уравнений равновесия (уравнения Эйлера) для вязкой жидкости, уравнения неразрывности и трёх уравнений движения, с учётом некоторых допущений, получено основное дифференциаль-

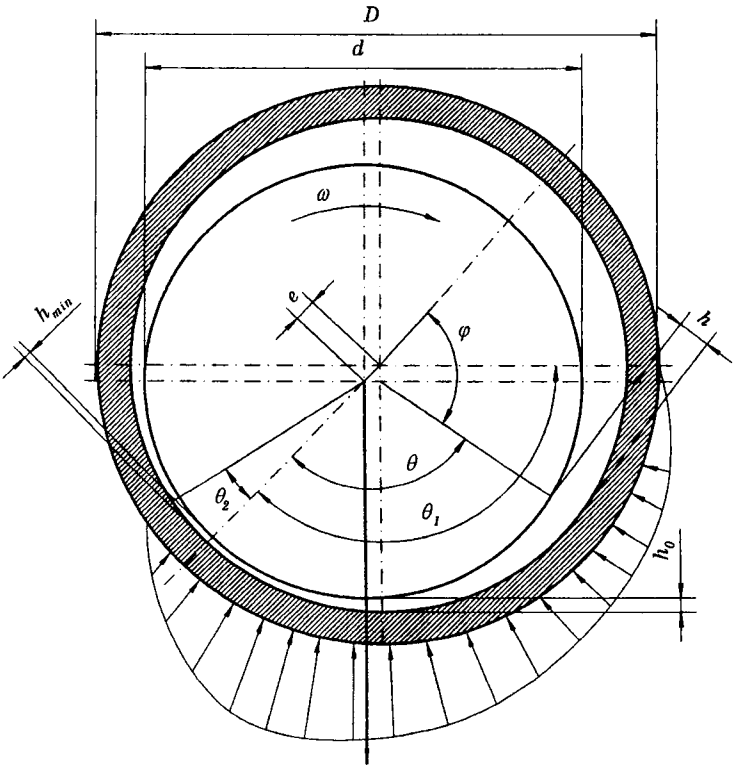


Рис. 2.4 Расчётная схема подшипника скольжения
D — диаметр цапфы, d — диаметр вкладыша, e — эксцентриситет между осями цапфы и вкладыша, h_{min} — минимальная толщина плёнки жидкости, h_0 — толщина плёнки жидкости в области максимального давления, φ — угловая координата, θ_1, θ_2 — значения углов начала и конца эпюры давления относительно линии центров

ное уравнение гидродинамической теории жидкостного трения (2.25), силы трения (2.26) и расхода жидкости (2.27):

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial\theta}\left[\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial\theta}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\right]+6\frac{V_{окр}}{r}\frac{\partial h}{\partial\theta}=0, \qquad (2.25)$$

$$F_{mp} = \int_{0,5}^{0,5} \int_{0_1}^{0_2} \tau r d\theta dz \qquad (2.26)$$

$$q_V = \frac{1}{2} \int_{0_1}^{0_2} \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} d\theta. \qquad (2.27)$$

Ввиду сложных зависимостей между давлением в слое жидкости от угла Θ и длины цапфы на практике для расчёта используют диаграммы безразмерных коэффициентов:

$\xi = \dfrac{W\psi^2}{ld\varpi\mu}$ — коэффициент нагруженности подшипника (W— несущая способность подшипника);

$\varepsilon = \dfrac{N2\psi}{ld^2\omega^2\mu}$ — коэффициент сопротивления цапфы вращению (N — потеря мощности на преодоление сил сопротивления вращению цапфы в подшипнике);

$q = \dfrac{q_V}{0{,}5\psi\omega ld^2}$ — коэффициент торцевого расхода (q_v — расход жидкости).

$\psi = (D - d)/d$ — относительный зазор;

D — диаметр цапфы;

d — диаметр вкладыша;

l — длина цапфы;

ω — угловая скорость вращения цапфы.

В последние годы сложился новый подход к формированию нетрадиционных технологий путём их взаимного комбинирования. Это привело к необходимости моделирования и создания так называемых комбинированных методов обработки. При этом базовые воздействия на материал детали сопровождаются теми или иными воздействиями, связанными гидродинамическими эффектами. Примером этому могут служить: магнито-абразивная обработка (рис. 2.5); анодно-абразивная обработка (рис. 2.6.);

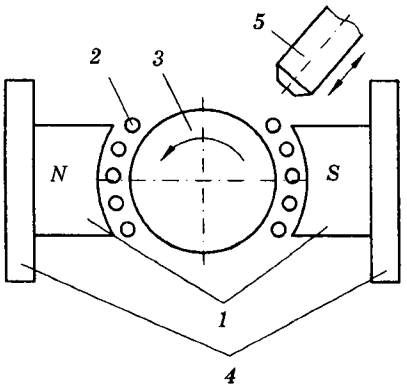


Рис. 2.5 Схема магнито-абразивной обработки: 1 — магнитный инструмент полюсных наконечников; 2 — абразивный порошок; 3 — обрабатываемая деталь; 4 — катушка индуктивности; 5 — сопло подачи рабочей жидкости

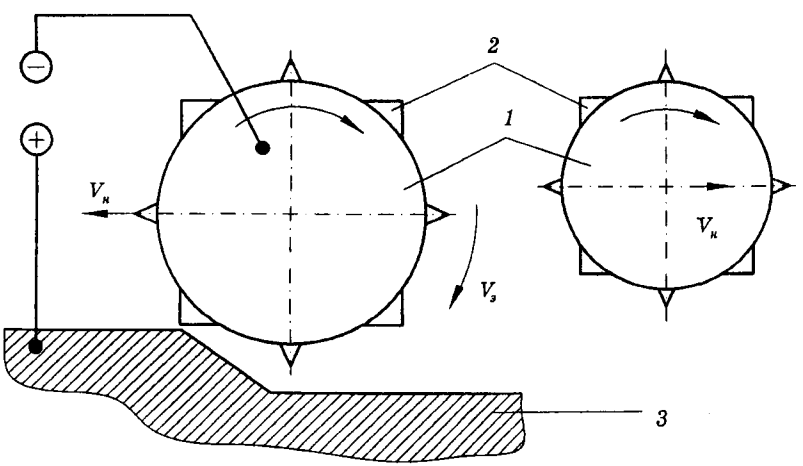


Рис. 2.6 Схема анодно-абразивной обработки: 1 — абразивный инструмент; 2 — абразивные (алмазные) зёрна; 3 — заготовка

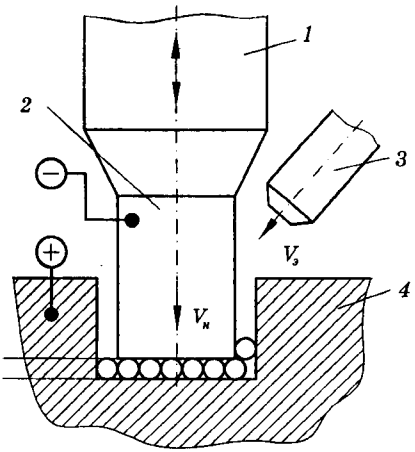


Рис. 2.7 Схема электрохимико-ультразвуковой обработки: 1 — ультразвуковой преобразователь; 2 — электрод-инструмент; 3 — сопло подачи рабочей суспензии; 4 — заготовка

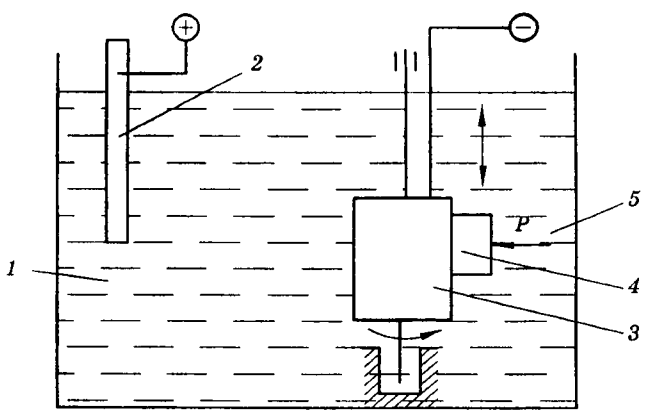


Рис. 2.8 Схема гальваномеханического хромирования; 1 — ванна с электролитом; 2 — анод-хром; 3 — обрабатываемая деталь; 4 — инструмент; 5 — усилие прижима

электрохимико-ультразвуковая обработка (рис. 2.7); гальваномеханическое хромирование (рис. 2.8) и т.д.

Кроме того, гидравлические системы энергетических установок, технологических машин, роботов и манипуляторов состоят из большого числа разнообразных устройств, соединённых между собой трубопроводами. Эти обстоятельства обуславливают актуальность рассмотренных математических моделей движения вязкой несжимаемой жидкой среды.

Однако для указанных устройств и методов обработки, в общем случае характерен нестационарный (неустановившийся) гидромеханический процесс. Поэтому их расчёт связан с решением дифференциальных уравнений (2.15-2.20) в частых производных при определении граничных условий. Чтобы получить указанные решения, необходимо использовать численные методы, рассмотренные в следующем параграфе.

2.4 РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЁТОВ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ЭВМ

2.4.1 Общая схема применения численных методов

К современной промышленности предъявляются жёсткие требования как по техническим характеристикам машин различного назначения, так и по экологической и техногенной безопасности, а также комфортности при их эксплуатации.

Удовлетворение этих требований возможно только при условии использования высоких наукоёмких технологий. В частности, полноценное и качественное инженерное обеспечение технических проектов возможно только на основе использования CAD/CAE/CAM технологий. Технологическая цепочка CAD/CAE/CAM (Computers Aided Design/Computer Aided Engineering/ Computer Aided Manufacture) обеспечивает точное математическое моделирование на всех этапах разработки новых образцов техники и совершенствования существующих машин, материалов и технологий.

В качестве примера, ниже будут рассмотрены некоторые возможности пакета ANSYS, с помощью которого можно решать задачи по расчётам на прочность, по теплотехнике, электротехнике, механике жидкости и газа (раздел Flotran). Для работы в среде Flotran необходимы знания в области механики жидкости и газа, основ вычислительных методов и программирования. Пакет имеет встроенные модули для многих известных систем CAD.

Специфика решения задач гидродинамики заключается в том, что поведение жидкости описывается в виде поля скоростей и термодинамических параметров, представляемых непрерывными функциями времени и пространства. Применение принципов сохранения массы, импульса и энергии позволяет получить систему дифференциальных уравнений в частных производных. Математическое описание задачи завершается наложением граничных и начальных условий, соответствующих рассматриваемому виду течения и дифференциальных уравнений.

Одной из существенных особенностей уравнений Навье-Стокса является их пространственно-эллиптический характер, обусловленный влиянием вязкости во всём поле течения. Система уравнений Навье-Стокса нелинейная, что обусловлено (в случае несжимаемой жидкости) инерционными составляющими в уравнениях количества движения. При достаточно больших числах Рейнольдса нелинейность уравнений Навье-Стокса приводит к образованию весьма сложных пространственно-временных структур.

В отличие от уравнений пограничного слоя для решения уравнений Навье-Стокса требуется задание граничных условий на всех границах рассматриваемой области, которая в реальных условиях часто бывает бесконечна, но при численной реализации должна быть конечной. Это приводит (в задачах внешнего обтекания) к так называемой «проблеме замыкания», что требует разработки приближённых асимптотических (приближающихся к определённому значению) решений.

В зависимости от конкретной физической ситуации различаются следующие виды граничных условий:

— граничные условия на непроницаемой твёрдой поверхности, называемые обычно условиями «прилипания». Наиболее часто в различных приложениях встречается обтекание неподвижной твёрдой стенки, когда $V_c = 0$;
— граничное условие вдали от обтекаемого тела, имеющее асимптотический характер: $V \to V_\infty$ при $r \to \infty$, где r — расстояние от поверхности обтекаемого тела;
— периодические граничные условия, представляющие собой специальный тип граничных условий, которые обычно ставятся при обтекании бесконечной последовательности повторяющихся тел. При этом параметры потока перед телом равны параметрам потока в следе за телом: $V_1 = V_2$;
— условия симметрии, представляющие специальный тип граничных условий, возникающих вследствие определённых предположений о свойствах симметрии течения (например, при обтекании симметричного профиля равномерным потоком под нулевым углом атаки).

В результате решения уравнений Навье-Стокса для ламинарного режима течения или уравнения Рейнольдса для турбулентного режима течения с помощью пакета определяется поле скоростей и поле давлений в области, на основании которых можно получить некоторые интегральные характеристики, например, коэффициент гидравлических потерь устройства. Схема применения численных методов при работе в среде пакета ANSYS сводится к некоторой последовательности действий.

1. Определение имени задания.

2. Выбор раздела в главном меню (в рассматриваемом случае — Flotran).

3. Определение типа элемента: плоского или пространственного.

4. Задание геометрии области течения посредством координат определяющих точек или прямоугольников (в случае простой геометрии).

5. Соединение введённых точек линиями.

6. Производство сеточного разбиения на границах области и создание конечно-элементной сетки.

7. Задание граничных условий: величин компонент скоростей во всех элементах входного сечения и нулевое значение скорости на стенках.

8. Задание величины давления на входе.

9. Задание свойств жидкости: плотности и вязкости в указанных единицах измерения.

10. Установка параметров решения в зависимости от возможностей компьютера и требуемой точности, (например, ввести число итераций).

11. Ввести команду «Решение» (Solution).

12. По завершению расчётов на экране появляется график, показывающий изменение компонент скоростей по осям, а также соответствующие значения давлений. Проводится анализ результатов расчёта. Решение может сходиться при достаточно большом числе итераций. Большое значение имеет также выбор расчётной области течения и корректность задания граничных условий.

13. Загрузка результатов последней итерации.

14. Просмотр поля скоростей. На экране появляется картина течения.

15. Просмотр полей давления. На экран выводятся изолинии давлений.

16. Программирование определения интегральных характеристик с помощью встроенной в систему вспомогательной программы или запись результатов для дальнейшей работы.

17. Выход из ANSYS [27].

Схема действий при работе с другим пакетом, например STAR-CO, будет в деталях отличаться. Однако общий подход, зависящий от структуры задачи, останется без существенных изменений.

STAR-CD является специализированным пакетом для решения задач механики жидкости и газа. Этот пакет позволяет решать задачи со свободными поверхностями, фазовы-

ми переходами и многофазными потоками. Возможно также получить решение для течений с кавитационными кавернами, проводить численное моделирование течений с химическими реакциями, в частности процессов горения. В процессе работы можно проводить изменение области интегрирования и использовать скользящие сетки, с помощью которых легко определять взаимодействие неподвижных и подвижных объектов.

GAS DYNAMICS TOOL представляет пример специализированного пакета по моделированию нестационарных и стационарных газодинамических процессов с учётом химических реакций, катализа, диффузии и горения.

Программный комплекс Flow Vision, созданный ООО «ТЕСИС», предназначен для моделирования трёхмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах. Пакет позволяет проводить визуализацию течений методами компьютерной графики. Возможно моделирование стационарных и нестационарных течений несжимаемой и сжимаемой жидкостей, а также моделирование потоков со свободной поверхностью. Используется адаптивная расчётная сетка и различные модели турбулентности.

2.4.2 Пример расчёта гидромеханических моделей в среде ANSYS

Рассмотрим пример гидродинамического анализа потока жидкости внезапно сужающегося от величины входного поперечного сечения S_1 до выходного сечения S_2 (рис. 2.9). Особенностью течения при внезапном сужении потока является его сужение за острой входной кромкой до некоторого поперечного сечения S и последующее его расширение до полного поперечного сечения трубы S_1.

В результате экспериментальных исследований таких течений вычислены значения коэффициента сопротивления течению жидкости ξ, который устанавливает взаимосвязь меж-

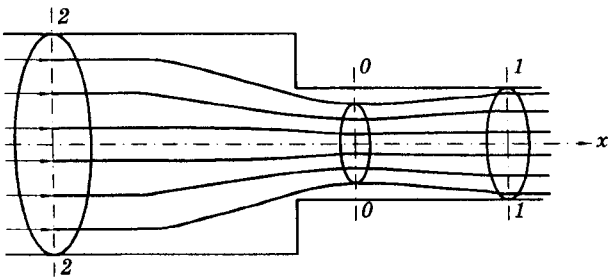


Рис. 2.9 Сужающийся канал

ду потерей давления Δp (перепад давления между сечениями 2 и 1 на рисунке 2.9) и кинетической энергией потока:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho V^2}{2}$$

Для проверки точности решения задач гидродинамики при помощи «ANSYS/FLOTRAN» сравним расчётные и экспериментальные значения перепада давлений (рис. 2.9).

Алгоритм решения задачи гидродинамики в среде ANSYS включает выполнение следующих действий:

1) идеализацию расчётной области (моделирование геометрии потока);

2) разбивку расчётной области на конечные элементы;

3) наложение условий непроницаемости;

4) определение скорости потока на входной границе и противодавления на выходной границе потока;

5) настройку алгоритма решения задачи (установка параметров потока) и установку параметров жидкости.

6) решение задачи и обработку результатов расчёта.

ЗАДАЧА: Для данной схемы течения воды (рис. 2.9) плотностью $\rho = 1000$ кг/м^3, коэффициентом динамической вязкости $\mu = 0{,}001$ Па·с, скоростью жидкости на входе $V_1 = 0{,}4$ м/с, противодавлением на выходе $p_2 = 10^5$ Па (атмосферное давление), принимая поток стационарным, несжимаемым и адиабатным требуется ОПРЕДЕЛИТЬ:

V_1 — скорость жидкости на выходе из канала;

p_1 — полное избыточное давление на входе в канал;

Δp_2 — перепад давлений;

картину графического распределения скоростей и полных давлений в канале.

РЕШЕНИЕ:

1. Запускаем программу и устанавливаем класс решаемых задач. Для нашего случая это задачи гидрогазодинамики. В диалоговом окне Preferences главного меню в поле FLOTRAN CFD ставится отметка √.

2. Для решения задач гидрогазодинамики в системе ANSYS предусмотрены два типа конечных элементов: FLUID 141 (для решения двумерных задач) и FLUID 142 (для решения трёхмерных задач). Для решения нашего примера выбираем двумерный элемент FLUID 141, используя следующие команды:

Main Menu (M_M): Preprocessor → Element Type → Add/ Edit/Delet

В открывшемся окне выбираем элемент FLUID 141.

3. Построение геометрии канала. Система ANSYS располагает средствами создания объектов-примитивов (узловых точек, линий, поверхностей, объёмов) с помощью которых осуществляют геометрическое построение объекта. Однако рациональней воспользоваться импортом файлов из среды CAD-систем, который реализуется с помощью обменных файлов нейтральных форматов (IGES, parasolid, STEP и другие).

Поскольку канал имеет простую двухмерную геометрию, покажем порядок построения средствами системы ANSYS.

Для этого на эскизе канала (рис. 2.10) проставляем ключевые точки (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8), с помощью которых строятся линии (1-2, 3-4, 5-6, и т.д.), образующие поверхности (области) течения потока. Построение геометрии канала осуществляем в три этапа (шага):

1 этап — построение ключевых точек:

— выбираем систему координат *xoy* (рис. 2.10);

— определяем и заносим в таблицу координаты ключевых точек (табл.1);

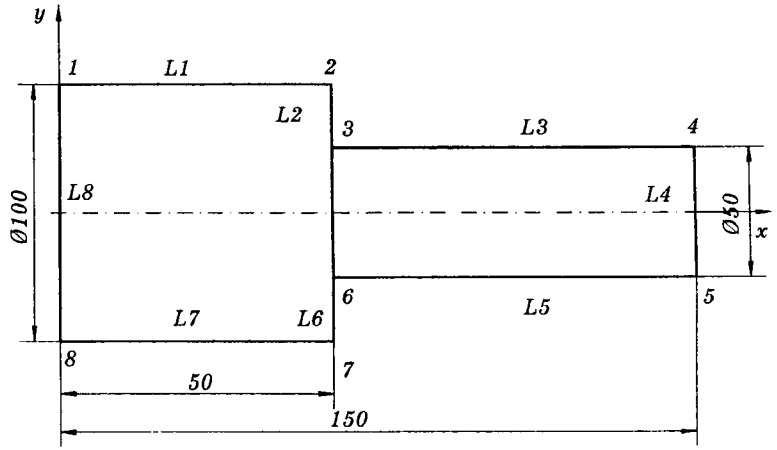


Рис. 2.10 Эскиз канала с ключевыми точками

Таблица 1

Координаты ключевых точек для построения модели канала

Номер точки	Координаты, мм	
	x	*y*
1	0	50
2	50	50
3	50	25
4	150	25
5	150	-25
6	50	-25
7	50	-50
8	0	-50

— вводим координаты формируемых ключевых точек в программу, открыв диалоговое окно с помощью команд: Main Menu (M_M):→Preprocessor→Modeling →Create→ →Keypoints→In Active CS.

Генерирование вводимой информации осуществляется нажатием клавиши ОК.

2 этап — построение линий по ключевым точкам, выполняем команду: M_M: →Preprocessor→Modeling→ →Create→ →Lines→Lines→Stright Lines.

После ввода этой команды курсор принимает вид стрелки, при помощи которой последовательно указываем точки, образующие линии (1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 5 и 6, 6 и 7, 7 и 2, 7 и 8, 8 и 1), линии при этом выделяются различными цветами. Генерирование вводимой информации осуществляется нажатием клавиши ОК.

3 этап — построение поверхности канала, выполняем команду:

M_M: →Preprocessor→Modeling-Create→Areas-Arbitrary→ →By Lines.

После ввода этой команды последовательно указываем все линии (порядок выбора линий произвольный), образующие область канала (линии высвечиваются различными цветами).

Генерирование вводимой информации осуществляется нажатием клавиши ОК. На экране появляется закрашенная область канала.

4. Созданаие конечно-элементной (КЭ) сетки. В программе ANSYS сетка может быть получена несколькими способами:

— импортированием готовой сетки из внешнего файла;

— одновременным созданием поверхностей и сетки;

— автоматическим разбиением на элементы.

Воспользуемся последним способом.

Сначала зададим длину стороны конечного элемента (КЭ), выполнив команду:

M_M: →Preprocessor®Meshing→Size Cntrs→Manual Size→ →Global→Size.

В диалоговом окне в поле Element edge length введём предельное значение длины стороны КЭ: «4» (величина длины КЭ зависит от геометрии канала и выбирается в пределах от 2 до 8 мм).

Для автоматического (свободного) генерирования сетки КЭ необходимо выполнить следующую команду:

M_M: →Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas-Free→Pick All. На экране отобразится конечно-элементная сетка канала.

5. Наложение граничных условий. Эти действия осуществляются в среде решателя Solution.

Первое условие — условие непроницаемости осуществляется командами: M_M: →Solution→Define Loads→Apply→ →FLUID/CFD→Velocity→On Nodes→Select.

(функцией Select выбираются узлы, принадлежащие предварительно указанным линиям L1, L2, L3, L5, L6, L7). В диалоговом окне указываем значения скорости по осям x и y. По условию непроницаемости $V_x = 0$, $V_y = 0$.

Второе условие — задание скорости потока на входе в канал осуществляется командами аналогичными первому условию с указанием узлов линии L8 (рис. 2.10). В диалоговом окне указываем значения скорости по оси y. По условию задачи $V_y = 0{,}4$ м/с.

Третье условие — задание противодавления на выходе из канала осуществляется командами:

M_M: →Solution→DefineLoads→Apply→Fluid/CFD→ →PressureDOF→OnNodes→Select. (функцией Select выбираются узлы, принадлежащие предварительно указанной линии L4, рис. 2.10). В диалоговом окне указываем значения противодавления $p_2 = 0$, что соответствует атмосферному давлению.

6. Определение параметров потока и физических свойств жидкости:

— *определяем параметры потока*. Находим число Рейнольдса. Для наших условий (диаметр канала на входе жидкости $d = 0{,}1$ м; скорость на входе $V = 0{,}4$ м/с; плотность жидкости $\rho = 1000$ кг/м^3, коэффициент динамической вязкости $\mu = 0{,}001$ Па · с) получим:

$$Re = \frac{Vd\rho}{\mu} = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}1 \cdot 1000}{0.001} = 40000$$

Поток жидкости турбулентный (Turbulence), адиабатный (Adiabatic), несжимаемый (Incompressible). Эти параметры устанавливаем в диалоговом окне после его открытия командами: M_M: Solution→Flotran Set Up→Solutions Options.

— *физических свойств жидкости.*

Для их установки открываем диалоговое окно командами:

M_M: Solution→Flotran Set Up→Fluid Properties.

В появившемся окне указывается, какие свойства жидкости будут определены. Для решения данной задачи это плотность (Density) и вязкость (Viscosity); остальные параметры установлены по умолчанию. После закрытия первого диалогового окна появляется окно для ввода значений физических свойств жидкости (Density-1000), (Viscosity-0,001).

7. Определение параметров итерационного процесса. Осуществляется командой:

M_M: Solution→Flotran Set Up→Execution Ctrl

В диалоговом окне указываются число итераций (Global Iterations; в нашем примере принято равным 130) и условия выхода из итерационного процесса Termination Criteria; в нашем случае это минимальная величина компонент скорости (0,01 м/с); давления ($1{,}9 \cdot 10^{-8}$ Па) и температуры ($1{,}9 \cdot 10^{-8}$ °С). Этим этапом завершается построение модели потока и она готова к расчёту.

8. Запуск вычислений выполняется командой:

M_M: Solution→Run FLOTRAN.

9. Анализ результатов расчёта.

— *численные результаты.* Они соответствуют последней итерации и читаются из базы данных путём ввода команды:

M_M: General Postproc→Read Results→Last Set.

Получаем следующие результаты:

— аксимальная скорость потока на входе в канал $V_1 = 0{,}4$ м/с,

— максимальная скорость потока на выходе $V_2 = 1{,}017$ м/с;

— полное давление на входе в канал $p_1 = 12{,}74$ Па;

— полное избыточное давление на выходе $p_2 = 7{,}32$ Па;

— перепад давления $\Delta p = 5{,}196$ Па.

Экспериментальное значение Δp = 4, 978 Па, имеет расхождение с расчётным 2,8 % и является допустимым.

- *распределение скорости потока в векторном виде* получим путём ввода команды:

M_M: General Postproc→Plot Results→Vector plot→ →Predefined;

— *распределение полного давления жидкости в канале* получим путём ввода команды:

M_M: General Postproc→Plot Results®Contour Plot→Nodal Solu, после чего в диалоговом окне в левом списке следует выбрать раздел Other quantities, а в правом — Total Pres.

При необходимости, используя модель турбулентности New K-E, может быть рассчитан коэффициент сопротивления течению жидкости.

Следует отметить, что численные методы и ЭВМ должны максимально избавлять нас от рутинной работы, компьютер должен быть умным и дисциплинированным помощником, но истинная творческая деятельность и принятие окончательных решений всегда будет в сфере личности человека. Поэтому ещё раз рассмотрим проблемы гидромеханики, с точки зрения развивающейся технической системы. Объектом нашего внимания будут всё те же уравнения Навье-Стокса. С методической точки зрения они рассматриваются нами как основное теоретическое «ядро» знаний.

Физики, решающие загадки чёрных дыр и полным ходом движущиеся к построению квантового компьютера, до сих пор не могут решить уравнения, которые описывают поведение самой обычной воды.

Свои имена уравнениям дали французский инженер Клод-Луи Навье (1785-1836), выдающийся мостостроитель, разработавший первую в мире теорию подвесных мостов, и Джордж Габриэль Стокс (1819-1903), научные заслуги которого в основном относятся к математической физике и дифференциальной геометрии. Он дал имя и британской единице вязкости (кинематическая вязкость, *Ст*-сток).

Неудивительно, что эти уравнения долгое время привлекали внимание математиков всего мира. И здесь есть серьёзные причины для гордости за отечественную науку: весомый вклад в развитие теории уравнений Навье-Стокса внесла Ольга Александровна Ладыженская, одна из замечательных представителей петербургской математической школы. Главным результатом Ладыженской в этой области было полное решение проблемы в двумерном случае: Ольга Александровна доказала однозначную разрешимость задачи. В трёхмерном случае она получила частичные результаты: доказала однозначную разрешимость уравнений на конечном промежутке времени, а также решила общую задачу в предположении малости так называемого числа Рейнольдса (этот параметр задаёт соотношение между инерцией и вязкостью; при больших значениях числа Рейнольдса поток становится турбулентным). А вот вопрос о единственности так называемого слабого решения Хопфа, которое существует для бесконечного промежутка, до сих пор остаётся открытым. Именно за ответ на него решение Clay Mathematical Institute готов заплатить миллион долларов.

В настоящее время продолжается активное исследование уравнений Навье-Стокса и поиск более рациональных и точных их решений. В связи с тем, что эти уравнения для несжимаемых жидкостей не линейны и не принадлежат к типу уравнений Коши-Ковалевской, известные точные решения немногочисленны, а применение численных методов вызывает ряд трудноразрешимых проблем. Численные методы решения полных уравнений Навье-Стокса в естественных переменных «вектор скорости — давление» приводит к нелинейным плохо обусловленным системам алгебраических уравнений, что вызывает численную осцилляцию решения при использовании прямых методов и ограничивает использование итерационных методов их решения. Исключение давления из числа независимых переменных с помощью введения функции тока и завихренно-

сти решает проблему обусловленности алгебраических систем, но вызывает новые трудности в восстановлении поля давления и удовлетворении граничным условиям для завихренности.

Из числа многочисленных работ, посвящённых проблеме решения уравнений Навье-Стокса отметим лишь одно направление, реализуемое современными учёными. Суть нового подхода состоит во введении некоторого силового поля, дивергенция которого равна давлению. В результате математических преобразований уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости принимают вид двух замкнутых связанных между собой уравнений Пуассона (векторных в трёхмерном случае или скалярных в двухмерном случае) для функции тока и силового поля. Конвективные члены уравнений Навье-Стокса преобразуются в квадратичные члены, содержащие первые производные от функции тока. Численное решение полученных уравнений может осуществляться методом сеток или методом конечных элементов. Восстановление компонент вектора скорости осуществляется дифференцированием функции тока, а давление — силового поля.

Такая постановка, в отличие от постановки в переменных «функция тока — завихренность», позволяет получить точное аналитическое решение задачи Пуазейля последовательным прямым интегрированием двух исходных дифференциальных уравнений. Для двумерных и трёхмерных задач требуется разработка алгоритмов итерационного процесса по нелинейности и способов задания граничных условий для введённого силового поля.

2.5 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ (МИНС) ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Эффективным методом моделирования технических систем является «Метод искусственных нейросетей». В условиях автоматизированного машиностроительного производства

актуальной является задача прогнозирования отказов и определения характеристик гарантированной наработки металлорежущего инструмента. Она может решаться при помощи моделей изнашивания и прогнозирования стойкости инструмента на базе создания экспертной системы на основе эмитационного нейросетевого моделирования процесса механообработки.

Большинство существующих теоретико-экспериментальных моделей выделяют какую-либо часть факторов, оказывающих значимое влияние на процесс и отбрасывают незначительно влияющие на выходные значения. С другой стороны синергетическое влияние большого числа таких факторов на каком-то этапе могут привести к смене механизма износа инструмента, что подтверждается экспериментально. Исходя из этого, требования, предъявляемые к вероятностно-статистической модели процесса резания, должны быть многокомпонентными:

— резание описывается как нестационарный случайный процесс;
— модель представляет собой функцию распределения отклонений фактических значений параметров резания от расчётных;
— модель должна решать задачу управления резанием, обеспечивающего его заданную надёжность и требования точности.

Например, в результате статистического анализа на стойкость минералокерамического инструмента установлено, что вероятность отказа в наибольшей степени удовлетворяет экспоненциальное распределение. Предложенная профессором А.С. Верещакой вероятностно-статистическая модель стойкости минералокерамического инструмента имеет вид:

$$P(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{T_0}\right)^m}, \qquad (2.28)$$

где $P(T)$ — вероятность отказа инструмента при заданном периоде стойкости;

m — статистический параметр, характеризующий степень разброса значений стойкости (влияние случайных факторов процесса);

T — заданный период стойкости (мин.);

T_0 — стойкость при вероятности отказа инструмента (мин).

Эта модель использует частный экспериментальный параметр m, имеющий определённое значение в конкретных условиях резания. Значения экспериментального параметра m могут быть дополнительно уточнены относительно конкретной производственной операции с помощью нейросетевого моделирования.

2.5.1 Базовые основы нейронных сетей

Нейронные сети являются упрощённым аналогом биологических нейронных сетей. Применяются, в основном, для решения задач классификации и прогнозирования. Кроме того, могут выступать в качестве универсального аппроксиматора (могут имитировать любую гладкую функцию). Они состоят из однотипных элементов, имитирующих поведение «живого» нейрона. Эти нейроны объединены в слои. Связи между нейронами устанавливаются таким образом, что выходы нейронов одного слоя одновременно являются входами нейронов последующего слоя. Внутри слоев нейроны между собой никак не связаны. Каждой связи сопоставляется числовая характеристика, которая называется весом связи (по-другому её можно ещё назвать силой связи). Сигнал, который проходит по связи, взвешивается, т.е. умножается на вес.

Нейронные сети работают в двух режимах: обычный режим и режим обучения.

В обычном режиме на вход сети подаётся набор числовых характеристик какого-либо объекта, который называется входным вектором, а на выходе сети получаем тоже набор чисел. Этот набор называется выходной вектор.

Таким образом, нейронная сеть выполняет функцию чёрного ящика, который на основании предъявляемых пользователем данных выдаёт желаемые выходные значения.

Однако, для того, чтобы сеть могла выдавать правильные отклики, требуется ее обучить. Эта процедура складывается из нескольких этапов.

Во-первых, необходимо подготовить т.н. обучающее множество, которое состоит из пар: входной вектор и вектор, который должен получиться на выходе (целевой вектор). Чтобы точность работы сети была достаточно приемлемой, необходимо набрать достаточно большое количество обучающих пар. Так обучающее множество, состоящее из 100-150 пар, считается маленьким и в этом случае при обучении сеть будет «капризничать». Подобрать оптимальную структуру сети будет достаточно сложно.

На втором этапе начинается собственно само обучение. В случайном порядке из обучающего множества выбирается пара. Входной вектор подаётся на вход сети, а целевой вектор сравнивается с выходным. Сеть считается обученной, если разница между целевым и выходным векторами (среднеквадратичная ошибка) меньше заданной величины. Если разница большая, то в сети с помощью специальных алгоритмов корректируются веса таким образом, чтобы уменьшить ошибку.

Обучение продолжается до тех пор пока общая ошибка в сети не станет меньше заданного значения.

Нейросетевой анализ данных

Нейросетевой анализ данных в автоматизированных производствах выгодно отличается и дополняет вышерассмотренные математические методы моделирования технических систем. Это ещё одно перспективное направление развития технической системы, обладающее, дополнительно к общеизвестным, следующими преимуществами:

— моделирование дискретных процессов механообработки при помощи нейронных сетей в автоматизированных производствах может быть успешно применено даже при относительно небольшом количестве экспериментальных данных;

— гибкость структуры: можно различными способами комбинировать простые составляющие нейрокомпьютеров — нейроны и связи между ними;
— возможность учитывать большое число различных факторов;
— возможность обрабатывать не поддающиеся обычному статистическому анализу (из-за возможной противоречивости) экспериментальные данные;
— возможность образовать устойчивую закономерность для дискретных процессов;

В основу искусственных нейронных сетей [6,22] положены следующие черты живых нейронных сетей, позволяющие им хорошо справляться с некоторыми типами задач:

- простой обрабатывающий элемент — нейрон;
- очень большое число нейронов участвует в обработке информации;
- один нейрон связан с большим числом других нейронов (глобальные связи);
- изменяющиеся связи между нейронами;
- массированная параллельность обработки информации.

Несмотря на простоту нейрона, сети, построенные из них, могут сформировать произвольную многомерную функцию на выходе.

Выбор количества нейронов и слоев

Нет строго определённой процедуры для выбора количества нейронов и слоев в сети. Чем больше количество нейронов и слоев, тем шире возможности слоев, тем медленнее она обучается и работает и тем более нелинейной может быть зависимость вход — выход.

Количество нейронов и слоев связано:
— со сложностью задачи;
— с количеством данных для обучения;
— с требуемым количеством входов и выходов сети;

— с имеющимися ресурсами: памятью и быстродействием машины, на которой моделируется сеть.

Если в сети слишком мало нейронов или слоев, то сеть не обучится и ошибка при работе сети останется большой, а так же на выходе сети не будут передаваться резкие колебания аппроксимируемой функции y(x).

Если нейронов или слоев слишком много, то:

— быстродействие будет низким, а памяти потребуется много, кроме того сеть переобучится (выходной вектор будет передавать незначительные и несущественные детали в изучаемой зависимости $y(x)$, например шум или ошибочные данные);

— зависимость выхода от входа окажется резко нелинейной: выходной вектор будет существенно и непредсказуемо меняться при малом изменении входного вектора x;

— сеть не будет способна к обобщению: в области, где нет или мало известных точек функции $y(x)$ выходной вектор будет случаен и непредсказуем, не будет адекватен решаемой задаче.

Ограничения модели нейрона

1) Вычисления выхода нейрона предполагаются мгновенными, не вносящими задержки.

2) В модели отсутствуют нейронные импульсы. Нет модуляции уровня сигнала плотностью импульсов, как в нервной системе. Не появляются эффекты синхронизации, когда скопления нейронов обрабатывают информацию синхронно, под влиянием периодических волн возбуждения — торможения.

3) Нет чётких алгоритмов для выбора функции активации.

4) Нет механизмов, регулирующих работу сети в целом.

5) Чрезмерная формализация понятий: «порог», «весовые коэффициенты». В реальных нейронах нет числового порога, он динамически меняется в зависимости от активности

нейрона и общего состояния сети. Весовые коэффициенты синапсов тоже непостоянны. «Живые» синапсы обладают пластичностью и стабильностью: весовые коэффициенты настраиваются в зависимости от сигналов проходящих через синапс.

Упрощённую модель биологического нейрона называют формальным или искусственным нейроном (ФН). Несмотря на простоту формального нейрона, сети, построенные из таких нейронов, могут сформировать произвольную многомерную функцию на выходе. Нейрон имеет несколько входных сигналов x и один выходной сигнал OUT. Параметрами нейрона, определяющими его работу, являются: вектор весов w, пороговый уровень Θ и вид функции активации F. На рисунке 2.11 изображена функциональная схема искусственного нейрона.

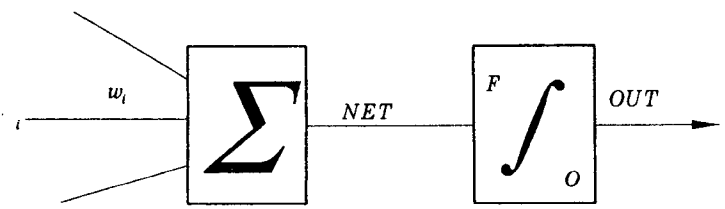


Рис. 2.11 Функциональная схема формального нейрона

Нейрон состоит из взвешенного сумматора и нелинейного элемента. Функционирование нейрона определяется формулами:

$$NET = \sum_i w_i x_i \tag{2.29}$$

$$OUT = F(NET - q), \tag{2.30}$$

где x_i — входные сигналы, совокупность всех входных сигналов нейрона образует вектор x.

w_i — весовые коэффициенты, совокупность весовых коэффициентов образует вектор весов w,

NET — взвешенная сумма входных сигналов, значение NET передается на нелинейный элемент;

Θ — пороговый уровень данного нейрона;

F — нелинейная функция, называемая функцией активации.

2.5.2 Многослойный персептрон — один из видов архитектуры нейросети

Формальные нейроны могут объединяться в сети различным образом. Самым распространённым видом сети стал многослойный персептрон, схема которого показана на рисунке 2.12.

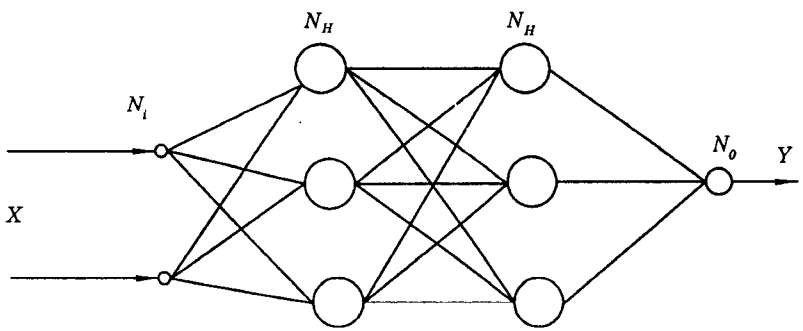


Рис. 2.12 Многослойный персептрон
N_i — нейрон входного слоя; N_H — нейроны скрытого слоя; N_o — выходные нейроны; x — вектор входных сигналов сети; y — вектор выходных сигналов сети

Сеть состоит из произвольного количества слоев нейронов. Нейроны каждого слоя соединяются с нейронами предыдущего и последующего слоев по принципу «каждый с каждым». Первый слой (слева) называется сенсорным или входным, внутренние слои называются скрытыми или ассоциативными, последний — выходным или результативным. Количество нейронов в слоях может быть произвольным. Обычно во всех скрытых слоях одинаковое число нейронов.

Работа многослойного персептрона описывается формулами:

$$NET_{jl} = Sw_{ijl}x_{ijl}, OUT = F\,(NET_{jl} - \theta_{jl}),\ xij(l+1), \quad (2.31)$$

где i — индекс обозначения номера входа;

j — индекс обозначения номера нейрона в слое;

1 — индекс обозначения номера слоя;

x_{ijl} — i-й входной сигнал j-го нейрона в слое l;

w_{ijl} — весовой коэффициент i-го входа нейрона номер j в слое k;

NET_{jl} — сигнал NET j-го нейрона в слое l;

OUT_{jl} — выходной сигнал нейрона;

Q_{jl} — пороговый уровень нейрона j в слое l.

Каждый слой рассчитывает нелинейное преобразование от линейной комбинации сигналов предыдущего слоя. Отсюда видно, что линейная функция активации может применяться только для тех моделей сетей, где не требуется последовательное соединение слоев нейронов друг за другом. Для многослойных сетей функция активации должна быть нелинейной, иначе можно построить эквивалентную однослойную сеть, и многослойность оказывается ненужной. Если применена линейная функция активации, то каждый слой будет давать на выходе линейную комбинацию входов. Следующий слой даст линейную комбинацию выходов предыдущего, а это эквивалентно одной линейной комбинации с другими коэффициентами, и может быть реализовано в виде одного слоя нейронов.

В многослойном персептроне нет обратных связей. Такие модели называются сетями прямого распространения. Они не обладают внутренним состоянием и не позволяют без дополнительных приёмов моделировать развитие динамических систем.

Типовые функции активации

Жёсткая ступенька (*рис. 2.13*):

$$OUT = \begin{cases} 0. & NET < \Theta \\ 1. & NET \geq \Theta \end{cases} \qquad (2.32)$$

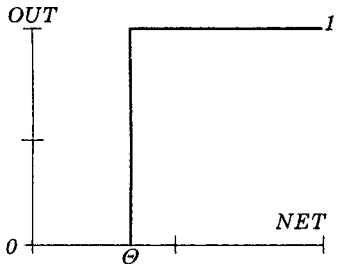


Рис. 2.13 Жёсткая ступенька (сигмоида)

Функция активации типа «жёсткая ступенька» применяется в формальном классическом нейроне. Её достоинство состоит в том, что нейроны с такой нелинейностью требуют малых вычислительных затрат.

К недостаткам можно отнести следующие:

— функция чрезмерно упрощена и не позволяет моделировать схемы с непрерывными сигналами;

— отсутствие первой производной затрудняет применение градиентных методов для обучения таких нейронов.

Логистическая функция (рис. 2.14):

$$OUT = \frac{1}{1 + e^{-NET}}. \qquad (2.33)$$

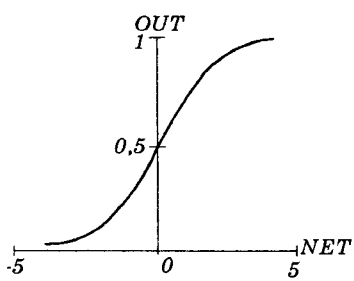


Рис. 2.14 Логистическая функция

Логистическая функция активации (сигмоида) применяется в многослойных персептронах.

Главными её достоинствами являются гладкость и непрерывность функции. Непрерывность первой производной позволяет обучать градиентными методами (например, метод обратного распространения ошибки). Кроме того функция симметрична относительно точки ($NET = 0$, $OUT = 1/2$), это делает равноправными значения $OUT = 0$ и $OUT = 1$, что важно для работы сети.

Недостатки: диапазон выходных значений от 0 до 1 несимметричен, из-за этого обучение значительно замедляется.

Гиперболический тангенс (рис. 2.15):

$$OUT = \frac{e^{NET} - e^{-NET}}{e^{NET} + e^{-NET}}. \qquad (2.34)$$

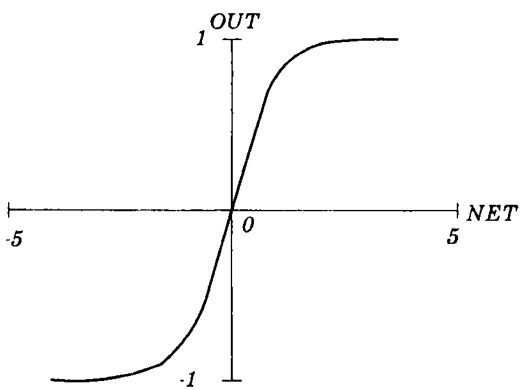


Рис. 2.15 Гиперболический тангенс

Функция активации типа «гиперболический тангенс» применяется в сети с непрерывными сигналами. Её достоинство состоит в том, что функция симметрична относительно точки (0, 0). Это является преимуществом перед логистической функцией активаци. Производная также непрерывна и выражается через саму функцию.

Гауссова кривая (рис. 2.16):

$$OUT = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(NET-m)}{2\sigma^2}}. \qquad (2.35)$$

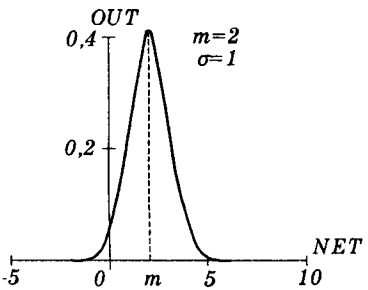


Рис. 2.16 Гауссова кривая

Применяется в случаях, когда реакция нейрона должна быть максимальной для некоторого определённого значения NET.

Подготовка входных и выходных данных

Данные, подаваемые на вход сети и снимаемые с выхода, должны быть правильно подготовлены. Один из распространённых способов подготовки — масштабирование. Его можно осуществить по следующей формуле:

$$X = (X' - m)c, \qquad (2.36)$$

где X' — исходный вектор;

X — масштабированный вектор;

m — усредненное значение совокупности входных данных;

c — масштабный коэффициент.

Масштабирование необходимо для приведения данных в желательный диапазон. Если этого не сделать, то возможно появление следующих проблем:

— нейроны входного слоя окажутся в постоянном насыщении ($|m|$ велик, дисперсия входных данных мала)

или будут постоянно заторможены ($|m|$ мал, дисперсия мала);

— весовые коэффициенты примут очень большие или очень маленькие значения при обучении (в зависимости от дисперсии), и, как следствие, растянется процесс обучения, снизится точность.

Исходя из условий конкретной задачи, можно выбрать другой способ подготовки данных. Например можно использовать нелинейные преобразования. При больших диапазонах изменения входных данных можно использовать логарифмическую шкалу.

Общая схема обучения персептрона

Обучение персептрона осуществляется путём выполнения следующих шагов:

1) инициализировать веса и параметры функции активации в малые ненулевые значения;

2) подать на вход один образ и рассчитать выход;

3) посчитать ошибку E^s, сравнив d^s и y^s;

4) изменить веса и параметры функции активации так, чтобы ошибка E^s уменьшилась;

5) повторить шаги 2-4 до тех пор, пока ошибка не перестанет убывать или не станет достаточно малой.

Здесь веса меняются так, что убывает не E, а E^s, относящаяся к образу s, а не ко всему обучающему множеству. Шаги в данном варианте алгоритма делаются не в направлении убывания E, а в направлении убыли E^s, таким образом, E не обязательно должна убывать. Какие условия необходимы для существенной убыли E? Опыт показывает, что для этого необходимо отсутствие упорядоченности в предъявлении образов, т.е. выборе s на каждой итерации. Если образы выбираются случайно из обучающего множества, то ошибка E чаще всего убывает. Если же есть упорядоченность (например, образы предъявляются циклически), то чаще всего $E(t)$, t — время обучения, не имеет предела при $t \to \infty$, т.е. алго-

ритм расходится. В этом случае E^s тоже убывает при каждом изменении параметров, но при следующей коррекции для образа $(s + 1)$ ошибка E^{s+1} убывает, а E^s, относящаяся к предыдущему образу возрастает сильнее, так что E может увеличиться сильнее. Сеть «забывает» предыдущий образ при предъявлении последующего.

Чтобы шаг по параметрам на каждой итерации делался в правильном направлении, надо провести усреднение по S, т.е. предъявить все образы, и коррекции вычислять по всем образам сразу. Такие алгоритмы называются алгоритмами с пакетной коррекцией. Они требуют больших затрат вычислительного времени и памяти, но сходятся за меньшее количество итераций.

В большинстве случаев $E(W, \Theta)$ при таком методе обучения сходится и достигает локального минимума. Для каждой конкретной задачи нет гарантий, что E сойдётся к приемлемому значению за конечное число шагов.

Задача поиска $\min\limits_{W,\Theta} E(W,\Theta)$ является задачей безусловной оптимизации. Для её решения известно множество методов. В теории оптимизации функция ошибки $E(W, \Theta)$ называется целевой функцией. Для нейронных сетей хорошо работают многие методы безусловной оптимизации, часто лучше, чем узкоспециальные, придуманные для обучения нейронных сетей.

Применяются следующие методы теории оптимизации:

для небольшого количества параметров — стабилизированные методы Ньютона, Гаусса-Ньютона, Левенберга-Маркардта;

для среднего количества параметров — квазиньютоновские методы;

для большого количества параметров — метод сопряженных градиентов.

Для сходимости алгоритма достаточно, чтобы на каждой итерации обеспечивалась существенная убыль E.

На практике сходимость обычно определяется методом проб и ошибок. Теория не даёт точных данных о количестве

итераций, требуемом для обучения персептрона конкретной задаче. Неизвестно также, сможет ли нейронная сеть вообще обучиться её решению.

Методы обучения

Обучение нейронной сети заключается в коррекции всех весовых коэффициентов в сети таким образом, чтобы ошибка отклика сети была минимальной.

В ходе работы использовался метод обучения по алгоритму эластичного распространения (Resilient Propagation).

При первоначальном формировании базы данных по материалу или режимам резания объёмы обучающих выборок невелики, поэтому лучше использовать алгоритмы из семейства так называемого пакетного обучения. При этом подходе веса в сети корректируются только после предъявления всех примеров из обучающей выборки. Образцом подобного алгоритма является метод эластичного распространения.

Особенности задач анализа процессов износа режущего инструмента при механической обработке резанием не исчерпываются выбором алгоритма обучения. Необходимо учитывать, что сети, обучаемые на малых выборках, очень чувствительны к выбору структуры сети.

На рисунке 2.17 отображена зависимость эффективности работы сети от количества нейронов в скрытом слое. Представлены результаты тестирования сетей, обученных на одних и тех же данных, но имеющих различную структуру. Видно, что разница даже в один нейрон приводит к падению эффективности распознавания на 3-4 %. Именно поэтому проблема выбора оптимальной структуры сети является исключительно актуальной. Для решения этой проблемы был разработан метод динамической оптимизации структуры сети.

Суть метода заключается в том, что создаётся трёхслойная нейронная сеть. Входной и выходной слои имеют одинаковое число нейронов, совпадающее с размерностью данных.

Число нейронов скрытого слоя должно быть меньше чем во внешних слоях.

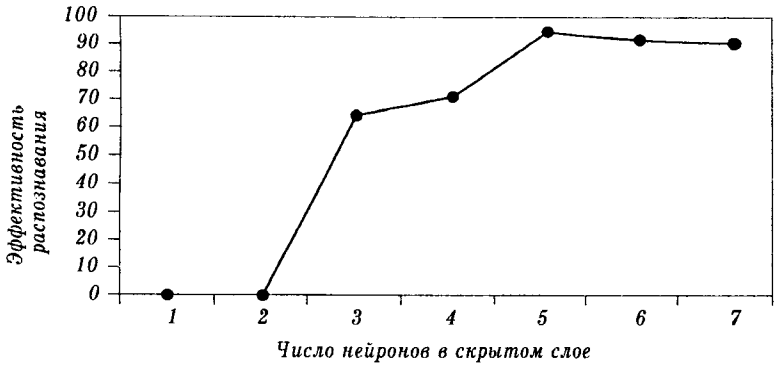


Рис. 2.17 Зависимость эффективности работы сети от количества нейронов в скрытом слое

Такая сеть называется еще рециркуляционной. Она позволяет сжимать и восстанавливать проходящие через неё данные. Основная проблема заключается в определении количества нейронов в скрытом слое. Для этих целей было применено динамическое добавление нейронов. Разработан комплексный метод динамической оптимизации структуры нейронных сетей на примере создания экспертной системы для прогнозирования процессов износа режущего инструмента, состоящий из двух частей: понижение размерности входных данных с помощью рециркуляционной нейронной сети и динамического добавления нейронов, а также оптимизация структуры нейросети в ходе её обучения путём объединения методов динамического добавления нейронов в сеть.

Построенная таким образом прогнозирующая экспертная система содержит в основе самоконфигурируемую нейронную сеть. Первоначально инициализация сети производится по числу анализируемых параметров (по размерности входного вектора). В дальнейшем производится обучение сети.

Если нейронов в сети недостаточно (погрешность больше указанной), то добавляется нейрон. Если в сети несколько скрытых слоев, осуществляется оценка их загруженности, и нейрон добавляется в самый загруженный слой. Дополнительно учитывается возможность «запоминания» сетью параметров вместо непосредственного обучения. Таким образом, выбор первоначальной структуры нейросети имеет первостепенное значение.

2.5.3 Оптимизация структуры сетей

Выбор оптимальной структуры нейронной сети является серьёзной проблемой, которая до сих пор не решена полностью. Известны различные методики для выбора оптимальной структуры сети, однако, в большинстве случаев, их применимость к той или иной задаче сильно зависит от входных данных. Самым надёжным средством для выбора структуры мог бы быть прямой перебор всех возможных конфигураций, неприемлемый для больших сетей, поскольку требует большого количества машинного времени. Для придания направленности процессу перебора вариантов в последнее время применяются так называемые генетические алгоритмы (ГА). Генетические алгоритмы основаны на эволюционных методах поиска, на принципе — «выживает сильнейший» и с успехом применяются для выбора подходящей структуры сети. ГА — это самообучающаяся модель, которая для решения поставленных перед ней задач использует механизмы естественного отбора, т.е. такие понятия, как популяция, особь, наследование и мутация. Сначала алгоритм выдвигает возможные решения. Затем, в каждом поколении, подобно биологическим организмам, решения «мутируют». «Слабые» решения «погибают», не удовлетворяя критерию эффективности, а «сильнейшие» — «скрещиваются», порождая новые решения.

Несмотря на то, что ГА эффективно решают задачи выбора оптимальной структуры, они имеют существенный недо-

статок: для функционирования алгоритма требуется много машинных ресурсов. В процессе тестирования генетического алгоритма на задаче выбора оптимальной структуры сети, решающей задачу классификации больных, было обнаружено, что необходимо создавать популяции сетей, состоящие из 100 и более особей каждая. Все эти сети приходилось ещё обучать и тестировать, а обучение сети — процесс долгий.

Поэтому предпочтительнее использовать такие методы поиска наилучшей структуры сети, для которых не требуется создавать популяцию сетей, а достаточно работать с одной и той же сетью. К таким методам следует отнести методы динамического добавления нейронов, всевозможные виды пранинга (prunning — урезание, выбрасывание малозначимых нейронов).

Из литературы была известна идея подбора оптимальной структуры сети путём динамического добавления нейронов в сеть (см. [8]).

Обычно обучение сети начинается с количеством нейронов, заведомо недостаточном для решения задачи. Для обучения используется метод Back Propagation. Обучение происходит до тех пор, пока ошибка не перестанет убывать и не выполнится следующее условие:

$$\frac{E(t)-E(t-\delta)}{E(t_0)} < \Delta \qquad (2.37)$$

$$t \geq t_0 + \delta\,, \qquad (2.38)$$

где t — время обучения;

Δ — пороговое значение убыли ошибки;

δ — минимальный интервал времени обучения между добавлениями новых нейронов;

t_0 — момент последнего добавления.

Когда выполняются оба условия, добавляется нейрон. Таким образом, дополнительный нейрон добавляется в том случае, когда относительная скорость изменения погрешности становиться меньше заданной величины. Обучение сети

прекращается, когда выполняется какое-либо из условий остановки, определяемое пользователем (например, достижение критического уровня погрешности или заданной эпохи).

Изменение ошибки при динамическом добавлении нейрона отображено на рисунке 2.18.

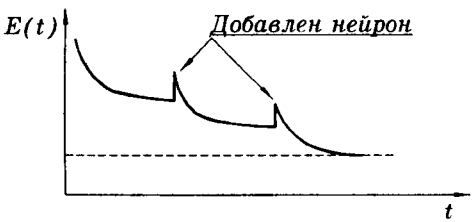


Рис. 2.18 Изменение погрешности в момент добавления нейрона

На рисунке видно, что в момент добавления нейрона ошибка кратковременно возрастает, но быстро достигает своего прежнего значения.

Pruning — это усечение малозначимых структурных элементов сети после её обучения [6, 8]. Можно выделить два вида усечения: весовое и структурное. При весовом усечении в обученной сети удаляются веса, которые имеют наименьшее значение. При структурном усечении удаляются отдельные нейроны или даже слои нейронов. Чтобы компенсировать удалённые элементы, поступают по-разному, например, корректируют веса у смещения или производят дополнительное обучение сети. В этом случае ошибка ведёт себя несколько по иному (рис. 2.19).

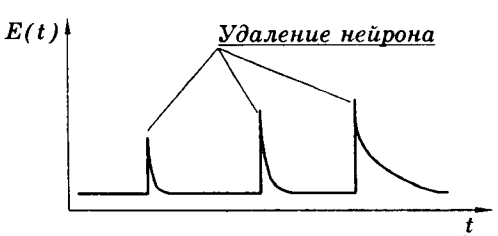


Рис. 2.19 Изменение погрешности в момент удаления нейрона

В момент удаления нейрона ошибка кратковременно возрастает, но быстро достигает своего прежнего значения. Однако, с каждым последующим удалением нейрона, сходимость ошибки замедляется, т.е. наблюдается вырождение сети.

На рисунке 2.20 представлена зависимость средней погрешности на обучающем множестве от количества нейронов во втором слое вычисленную методом перебора числа нейронов скрытого слоя.

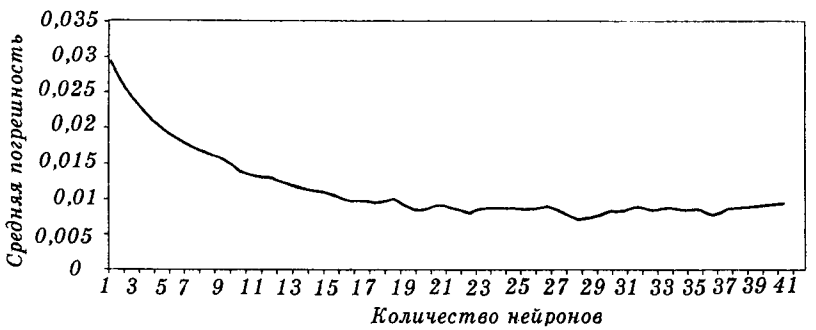


Рис. 2.20 Зависимость средней погрешности на обучающем множестве от количества нейронов в скрытом слое

График показывает, что при увеличении количества нейронов второго слоя погрешность сети вначале изменяется довольно сильно, а затем изменение становится очень незначительным. Это означает, что при увеличении количества нейронов погрешность сети изменяется мало, нет необходимости в дальнейшем увеличении количества нейронов, т.е. найден оптимум.

Контрольные вопросы

1. Какие силы необходимо учитывать для математического описания движения жидкости?
2. В чём состоит сущность метода Эйлера, использующегося для изучения движения жидкой среды?

3. На основании какого закона можно получить наиболее общее уравнение движения жидкой среды — уравнение движения в напряжениях?

4. Запишите уравнение движения жидкой среды в напряжениях в векторной форме.

5. Что такое субстанциальная производная?

6. Как записать значение субстанциальной производной от вектора скорости по времени?

7. В каких случаях движения жидкости система уравнений в напряжениях может иметь частные решения?

8. Между какими величинами устанавливает связи закон внутреннего трения Ньютона?

9. Запишите уравнения Навье-Стокса для неустановившегося движения вязкой сжимаемой жидкой среды в векторной форме.

10. Чем заменяют дифференциальные уравнения гидродинамической теории жидкостного трения при практических расчётах подшипников скольжения?

11. В чём состоит специфика решения задач гидродинамики?

12. Сформулируйте общую схему применения численных методов в среде ANSYS.

13. В чём состоит современная трактовка смысла и значения уравнения Навье-Стокса, методов его решения?

ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

3.1 ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

В этой главе приводятся примеры использования математических моделей при проектировании и расчёте гидро- и пневмоподшипников скольжения, а также для управления некоторыми физическими процессами при абразивной обработке.

3.1.1 Моделирование производительности (величины съёма) при виброабразивной обработке

Рассмотрим применение математической модели для теоретического исследования влияния состава и свойств смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) на процесс виброабразивной обработки (ВиАО) металлов.

Эффективность использования СОТС при металлообработке зависит от точности модели, используемой для расчёта характеристик среды. Для этого рассмотрим механику взаимодействия двух тел, разделенных слоем СОТС. Решение этой задачи позволит прогнозировать влияние состава и свойств СОТС на съём металла при ВиАО.

Пусть движущийся абразивный инструмент (гранула) с режущим профилем в виде абразивных зёрен сферической формы находится в потоке жидкости, обладающем гидродинамическими свойствами, внедряется под углом α в обрабатываемую деталь. Поверхность детали и гранулы разделена слоем СОТС. В связи с тем, что СОТС содержит присадки, в дальнейшем будем использовать уравнение Навье-Стокса для вязко-пластичной среды:

$$\rho\left(\vec{V}\nabla\right)\vec{V} = -\nabla p + \left(\mu + \frac{\tau_0}{H'}\right)\nabla^2\vec{V} - \frac{2\tau_0}{H'^2}T_\varepsilon \nabla H', \qquad (3.1)$$

где: p — гидродинамическое давление, Па;

τ_0 — предельное напряжение сдвига, Па;

T_ε — тензор скоростей деформации;

∇, ∇^2 — операторы Гамильтона и Лапласа;

H' — интенсивность скоростей деформации;

$\vec{V}$ — вектор скорости, м/с;

ρ — плотность, кг/м^3;

μ — динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Рассмотрим внедрение жёсткой сферической частицы в деформируемое полупространство обрабатываемой поверхности (рис. 3.1).

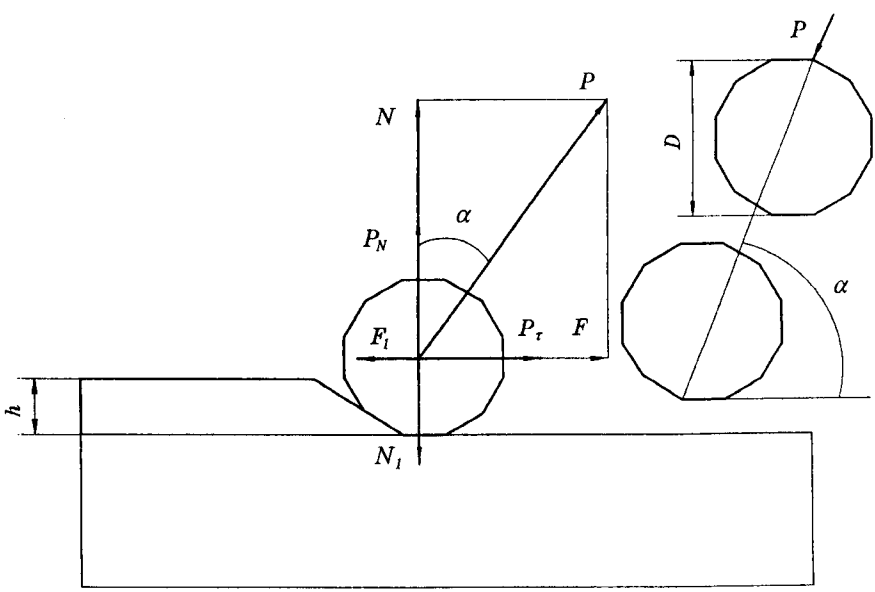


Рис. 3.1 Схема взаимодействия гранулы с обрабатываемой поверхностью

Этот процесс описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2h}{dt^2} = -P_N \\ \dfrac{d^2x}{dt^2} = -P_\tau \end{cases}, \qquad (3.2)$$

где $m = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_Y$ — масса абразивной частицы;

ρ_r — средняя плотности частицы; R — радиус частиц;

h — глубина внедрений за время t;

x — перемещение вдоль горизонтальной оси за время t.

$P_N = \cdot (N \cdot N_1)$ — результирующее нормальное усилие;

$P_\tau = \cdot (F \cdot F_1)$ — результирующее касательное усилие;

здесь N и F — нормальное и касательное усилие (при отсутствии слоя жидкости на поверхности обрабатываемой детали);

N_1 и F_1 — нормальное и касательное усилие, обусловленное воздействием вязко-пластичной жидкости;

Для решения системы (3.2) возникает необходимость решения задачи, вязанной с определением дополнительных усилий N_1 и F_1 обусловленных воздействием слоя СОТС.

Контактную задачу будем решать для схемы, когда абразивное зерно в конечном положении (после внедрения на глубину h контактирует с обрабатываемым материалом по радиусу. При этом предположении математическую модель задачи будем базировать на контакте двух цилиндров, разделенных слоем СОТС (рис. 3.2).

Пусть внутренний цилиндр R_2 — вращается с постоянной угловой скоростью ω_0, а внешний R_1, жёстко закреплён. В общем случае радиусы их цилиндров примем неодинаковыми из-за упругого восстановления полупространства.

Выразив в полярной системе координат уравнения движения внутреннего и внешнего цилиндров, приняв граничные условия для рассматриваемого случая, перейдя к без-

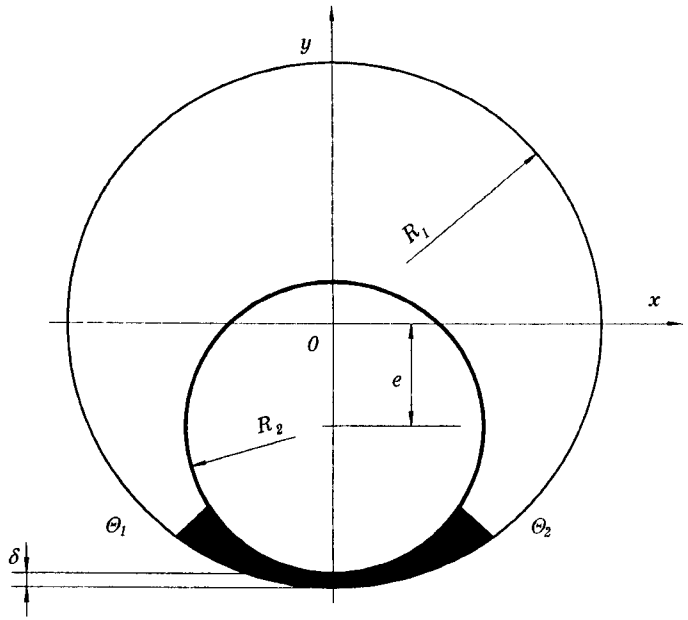


Рис. 3.2 Схема для определения усилий, обусловленных воздействием слоя СОТС на абразивную частицу

размерным переменным и опуская выводы будем иметь следующие соотношения:

$$\frac{dP}{dr} - = 0; \quad \frac{d^2V}{dr^2} = \frac{dP}{d\theta} + A; \quad \frac{dU}{dr} + \frac{dV}{d\theta} = 0; \quad A = \frac{2\tau_0\delta}{\mu\omega_2 R_2}, \qquad (3.3)$$

где V и U — компоненты вектора скорости, полученные при переходе к безразмерным величинам, соответствующие граничным условиям для R_1 и R_2;

при $r = 0$, $U = 0$, $V = 1$;

$r = h(\theta)$ $U = 0$, $V = 0$;

В соотношениях (3.3), являющихся аналогом уравнения Рейнольдса для вязко-пластичной смазки A — это комплексный безразмерный показатель:

$$A = \frac{2\tau_0 \delta}{\mu \omega_2 R_2}, \qquad (3.4)$$

где δ — зазор мужду абразивной частицей и обрабатываемой поверхностью;

τ_0, μ — параметры, характеризующие свойства СОТС и определяются экспериментально;

ω_2, R_2 — угловая скорость и радиус внутреннего цилиндра.

Остановимся подробнее на свойствах этого показателя. Параметры τ_0, μ характеризуют свойства СОТС и определяются экспериментально. Эти параметры при установившихся условиях обработки имеют значения, характеризующие технологический процесс. Зазор δ при идеализированной постановке задачи, когда процесс внедрения частицы моделируется стационарным течением в кольцевом канале, не имеет какого-либо постоянного значения. Однако следует принять во внимание, что реальный процесс внедрения сферической частицы в поверхность детали в значительной степени обусловлен микрогеометрией как абразивной частицы, так и детали. Причём радиус кривизны поверхности частицы значительно (а для финишных методов обработки на несколько порядков) превосходит радиусы скругления микровыступов поверхностей.

С другой стороны, определяющее влияние на процесс съёма материала оказывает активная фаза внедрения частицы в поверхность, зависящая от геометрических характеристик абразивных зёрен. Поэтому вполне обоснованным допущением будет то, согласно которому величина зазора δ близка средней высоте выступания абразива над связкой. Размер абразивной частицы и средняя угловая частота их вращения являются управляемыми факторами технологического процесса виброабразивной обработки. Приведённые соображения дополнительно обосновывают допустимость принятого модельного гидродинамического описания, основанного на решении задачи о стационарном течении в эксцентричном канале.

Действительно, малость зазора δ, т.е. малость объёма жидкости в зазоре значительно уменьшает постоянную времени установления стационарного режима течения. Попутно заметим, что параметр A не теряет своих представительных свойств при переходе к обычной ньютоновской жидкости, например воде. Действительно, в этом случае предельное напряжение сдвига обращается в нуль, и получаемые соотношения сводятся к известным, полученным без учёта гидродинамической компоненты взаимодействия. Это обстоятельство позволяет ожидать от выводимых соотношений описания процессов вибрационной обработки, как при разовой заливке, так и при непрерывной промывке технологической жидкостью.

Таким образом, введённый показатель гидродинамического влияния СОТС на процесс финишной обработки, зависит от управляемых факторов и может быть количественно задан некоторым интервалом или средним значением, обусловленным случайным характером изменения угловых скоростей и высотных микрогеометрических параметров абразивных частиц.

Перейдём к определению сил давлений, действующих на внутренний цилиндр. Проекции на ось oy и ox результирующей сил давлений отнесенной к единице длины внутреннего цилиндра соответственно равны:

$$P_x = \frac{\mu\omega R_2^2}{\delta^2}\int_{\theta_1}^{\theta_2} P(\theta)\cos\theta d\theta, \quad P_x = \frac{\mu\omega R_2^3}{\delta^2}\int_{\theta_1}^{\theta_2} P(\theta)\cos\theta d\theta . \quad (3.5)$$

Интегрированием системы (3.2) можно получить следующее выражение:

$$m\frac{d^2h}{dt^2} = -\pi Rhc\sigma_s + N_1 \quad \text{или} \quad \frac{d^2h}{dt^2} = -\frac{3c\sigma_S h}{4\rho_r R^2} + \frac{3N_1}{4\pi\rho_r R^3}, \quad (3.6)$$

используя соотношения:

$$P_N = \pi Rhc\sigma_s - N_1, \quad P_t = f\,P_N, \quad (3.7)$$

где $c\sigma_s$ — среднее разрушающее напряжение на контакте;

σ_s — предел прочности материала;

c — эмпирический коэффициент характеризующий влияние СОТС.

После некоторых преобразований получим:

$$\frac{dh}{dt} = \pm\sqrt{V_0^2 \sin^2 \propto - \frac{3c\sigma_S h^2}{4\rho_r R^2} + \frac{3N_1 h}{2\pi\rho_r R^3}}. \qquad (3.8)$$

Так как при $h = h_{max}$ $\frac{dh}{dt} = 0$, получим квадратное уравнение:

$$\frac{3c\sigma_S}{4\rho_r R^2} h_{max}^2 - \frac{3N_1 h_{max}}{2\pi\rho_r R^3} - V_0^2 \sin^2 \alpha = 0 \qquad (3.9)$$

Таким образом, при учёте влияния состава и свойств СОТС максимальная глубина внедрения частицы h_{max} является корнем квадратного уравнения (3.9) и имеет следующее решение:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

где $x = h_{max}$, $a = \frac{3c\sigma_S}{4\rho_r R^2}$, $b = \frac{3N_1 h_{max}}{2\pi\rho_r R^3}$, $c = V_0^2 \sin^2 \alpha$;

$$h_{max} = \frac{\frac{3}{2}\frac{N_1}{\pi\rho_r R^3} \pm \sqrt{\frac{9N_1^2}{4\pi^2\rho_r^2 R^6} + 4V_0^2 \sin^2 \alpha \cdot \frac{3c\sigma_S}{4\rho_r R^2}}}{\frac{3c\sigma_S}{2\rho_r R^2}}, \qquad (3.10)$$

где N_1 — нормальное усилие, обусловленное воздействием вязко-пластичной жидкости;

ρ_r — средняя плотности абразивной частицы при контакте с обрабатываемой поверхностью;

R — радиус частиц;

$V_0 = \omega R_2$ — компонента скорости частицы;

α — угол, определяемый соотношением P_N и P_τ;

c — эмпирический коэффициент характеризующий влияние СОТС;

σ_s — предел прочности материала.

Результаты численного анализа полученных соотношений приведенные на рисунке 3.3. График построен таким образом, чтобы можно было показать зависимость глубины внедрения абразивного инструмента от двух параметров (σ_s — предела прочности материала и N_1 — нормального усилия, обусловленное воздействием вязко-пластичной жидкости). На оси h откладываются значения h направленные вниз. Над пространственным графиком располагается нулевой уровень воображаемой обрабатываемой поверхности.

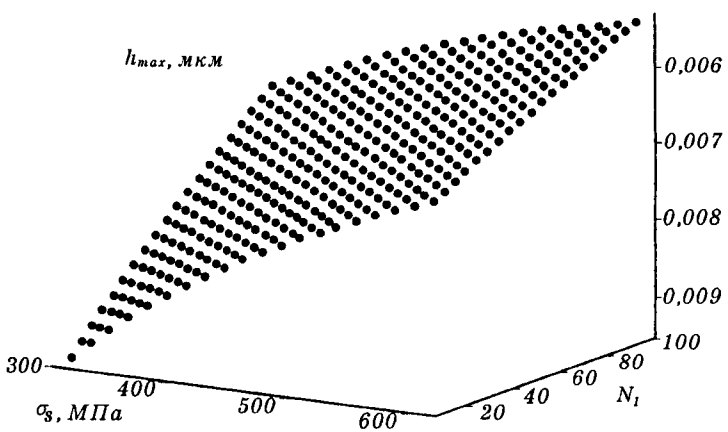


Рис. 3.3 Зависимость максимальной глубины внедрения абразивной частицы от предела текучести материала и свойств СОТС при виброабразивной обработке

Из графика видно, что физико-механические свойства, определяемые составом СОТС, оказывают существенное влияние на глубину внедрения абразивного инструмента, а также на увеличение предельного напряжения сдвига СОТС (т.е. повышение силы N_1 приводит к уменьшению глубины внедрения абразивного инструмента).

Совокупность выведенных формул решает задачу определения производительности рассмотренных процессов виброабразивной обработки, позволяет проанализировать влияние различных факторов — свойств СОТС, материала, абразива и условий изнашивания на величину износа.

3.1.2 Упругий гидромеханический контакт в зоне шлифования

Для раскрытия механизма действия СОТС, а, следовательно, и повышения эффективности её использования, важное значение имеют исследования гидро- и аэродинамических явлений, протекающих в зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемым изделием.

В литературе [14] проведены исследования реальных условий резания при плоском шлифовании периферией круга на станке модели 3Г71. Измерение гидродинамического давления СОТС осуществлялось с помощью специальной установки. В приспособлении закреплялся образец из закаленной стали ШХ15СГ, в котором было просверлено отверстие диаметром 1,5 мм. Через него СОТС из зоны контакта шлифовального круга 1 с образцом 2 сообщалась с первичным преобразователем давления 3, представляющим полый тонкостенный цилиндр, на наружную поверхность которого наклеивались тензорезисторы, а внутренняя полость заполнялась СОТС. Для определения размеров гидравлического клина, а также положения его относительно вертикальной оси круга, использовался первичный преобразователь в виде тензометрической балки, закреплённой на станине и изгибающуюся под действием кулачка. Сигналы, полученные от первичных преобразователей, поступали на светолучевой осциллограф, усиливаясь с помощью усилителя. Давление воздушного потока, создаваемого вращающимся шлифовальным кругом, измерялось манометром.

Шлифование производилось кругами характеристик 24А(6-40)НС17К6 и 63С6НСІ7В с применением нескольких

типов СОТС: 5%-го раствора эмульсола ЭТ-2; 0,8%-го раствора кальцинированной соды с добавкой 0,3 % тринатрийфосфата и 0,3 % нитрита натрия; масла И-20А. Режимы резания были типовыми: скорость круга — 35 м/с; продольная подача — 6,5 м/мин.; поперечное перемещение крута — 3 мм за один ход; глубина резания — 0,005...0,015 мм.

На рисунке 3.4, *а* приведена копия осциллограммы распределения гидродинамического давления p_x СОТС в зоне между шлифовальным кругом и обрабатываемой поверхностью. Анализ её показывает, что в сужающейся по ходу вращения круга части контактной зоны образуется гидравлический клин с избыточным давлением СОТС, а в расширяющейся — развивается отрицательное (вакуумное) давление жидкости. На расстоянии от оси круга большем, чем x_2, центробежные и вихревые потоки воздуха, создаваемые инструментом, отбрасывают жидкость от его рабочей поверхности. Постепенное увеличение гидродинамического давления приводит к разрушению воздушной оболочки, и СОТС затягивается абразивным кругом в постепенно сужающуюся щель по направлению к зоне резания. В точке, близкой к осевой линии гидравлическое давление достигает максимума. В точке *с* с координатой x_1 давление СОТС падает до нуля, и на последующем участке образуется разрежённое пространство вследствие расширения жидкости и воздуха, сжатого в порах круга в момент прохождения через зону резания.

В наибольшей степени гидродинамическое давление СОТС зависит от материала связки шлифовального круга. Сравнение давления при шлифовании кругами на вулканитовой и керамической связках показывает, что в первом случае оно намного выше при одинаковой зернистости. Это объясняется тем, что вследствие податливости вулканитовой связки при шлифовании происходит уменьшение расстояния от неё до обрабатываемой поверхности, и в результате жидкость сильнее сжимается между кругом и деталью. Кроме того, круги на вулканитовой связке почти не содержат пор и создают менее интенсивные по сравнению с керамическими воздуш-

ные потоки, ослабляющие в некоторой степени гидродинамический эффект.

Гидродинамическое давление СОТС возрастает при уменьшении зернистости инструмента. Происходит это вследствие того, что, во-первых, уменьшается зазор между связкой круга и обрабатываемой поверхностью и, во-вторых, снижается давление воздушного потока из-за уменьшения шероховатости абразивной поверхности круга. Установлено, что гидродинамическое давление СОТС возрастает при увеличении глубины резания от 0 до 0,003 мм и вязкости СОТС, а также при переходе от встречного шлифования к попутному.

Наибольшее измеренное значение гидродинамического давления СОТС при шлифовании кругом на вулканитовой связке — $9.7 \cdot 10^5$ Па, а кругом на керамической связке — $3 \cdot 10^5$ Па. Средняя длина гидравлического клина $x_1 + x_2$ составляет 20...25 мм при диаметре круга 250 мм.

Анализ результатов исследований показывает, что между механизмом образования гидравлического клина при шлифовании и в подшипнике скольжения много общего, причём паравулканитовый круг — деталь в наибольшей степени соответствует общепринятым представлениям о гидравлическом

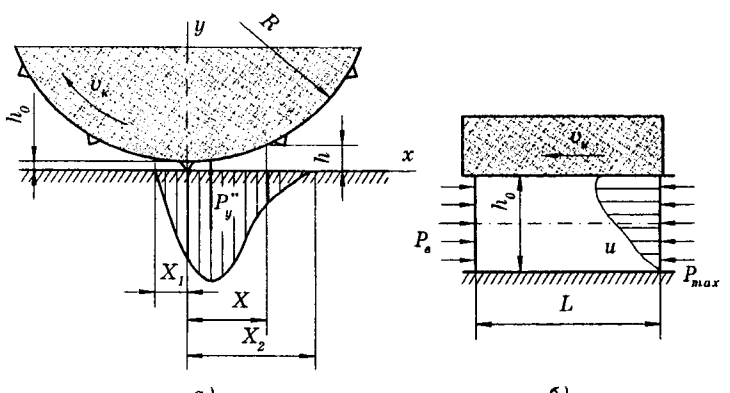


Рис. 3.4 Схема расчёта:
а — гидравлического давления и б — скорости жидкости в зоне резания

клине. С учётом ряда допущений можно применить к описанию гидродинамических явлений при шлифовании уравнения гидродинамики (2.19) и его частное решение (2.24).

Найдём силу, действующую на шлифовальный круг со стороны гидравлического клина. Расчётная схема представлена на рисунке 3.4, *а*.

Применительно к данной расчётной схеме, на основании уравнения гидродинамики (2.19) и его частного решения (2.24) запишем уравнение для давлений, возникающих в гидравлическом клине, которое носит название уравнения Рейнольдса:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{6\mu V_k (h - h_m)}{h^3}, \tag{3.11}$$

где μ — коэффициент динамической вязкости СОТС;

h_m — толщина слоя жидкости в том месте, где давление $p(x)$ достигает максимума.

Тогда

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R}, \tag{3.12}$$

где h_0 — минимальная толщина слоя жидкости между кругом и обрабатываемой поверхностью, т.е. среднее расстояние от связки до обрабатываемой поверхности;

R — радиус шлифовального круга.

На основании уравнений (3.11) и (3.12), давление в любой точке на расстоянии x от начала координат, где $h = h_0$

$$\frac{dP}{dx} = \frac{24\,\mu V_k R^2 \left(x^2 - x_m^2\right)}{\left(a^2 - a_m^2\right)^3} \qquad P(x) = 24\,\mu V_k R^2 \int_{x_1}^{x} \frac{\left(x^2 - x_m^2\right)}{\left(a^2 - a_m^2\right)^3} dx,$$

где $a^2 = 2Rh_0$.

Сила, приходящаяся на единицу ширины шлифовального круга, есть:

$$p_в'' = \int_{x_1}^{x} p(x)dx \qquad p_в'' = \frac{3\,\mu V_k R}{h_0} \vartheta B K_в, \tag{3.13}$$

где B — ширина круга, мм.;

K_B — коэффициент распределения давления по ширине шлифовального круга (определяется экспериментально);

ϑ — безразмерный коэффициент нагруженности шлифовального круга.

Установлено, что закон распределения гидродинамического давления по ширине круга близок к прямоугольному. Особенно это характерно для крупнозернистых кругов (зернистость 25...40). Объясняется это тем, что выступающие из связки абразивные зёрна являются некоторым препятствием и затрудняют истечение жидкости из гидравлического клина со стороны торца круга. Для кругов на керамической связке зернистостью 6, $K_B = 0{,}90$; 16, $K_B = 0{,}93$; 25...40, $K_B = 0{,}90$. Для кругов на вулканитовой связке зернистостью 6, $K_B = 0{,}87$.

3.2 ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ОПОР

Развитие новой техники в середине прошлого столетия столкнулось с проблемой создания опор (подшипников), позволяющих обеспечить надёжную работу высокооборотных узлов в различных машинах и агрегатах при скоростях вращения, достигающих сотен тысяч оборотов в минуту. Для точного приборостроения и измерительной техники потребовались подшипники с ничтожно малым трением, а в атомном и химическом машиностроении — опоры, способные работать в условиях радиации, высоких и низких температур, а также в химически активных средах. Этим запросам техники не могли удовлетворить ни подшипники скольжения с жидкой смазкой, ни подшипники качения. Поиски новых типов опор привели к выводу, что наиболее перспективными являются опоры, в которых в качестве рабочего вещества, заполняющего зазор между трущимися поверхностями, используется не жидкая смазка, а газ (например, воздух).

Возможность использования газа в качестве смазывающего вещества в подшипниках скольжения была известна ещё в конце девятнадцатого столетия. В них эффект поддер-

жания шипа вала осуществляется за счёт «эффекта клина», который был рассмотрен ранее. Газовые подшипники, принцип действия которых основан на «эффекте клина», называют самоподдерживающимися или скоростными. В конце сороковых годов прошлого столетия опоры скольжения на газовой смазке стали применяться в станкостроении, прежде всего благодаря работам сотрудников Экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих станков (ЭНИМСа) под руководством профессора С.А. Шейнберга. Примерно в это же время у нас в стране и за рубежом появились газовые опоры принципиально другого типа — так называемые газовые подвесы или пневмоподвесы.

В этих опорах эффект поддержания (или подъёмной силы) осуществляется за счёт подачи газа под давлением в зазор между шипом и подшипником. При этом шип оказывается как бы свободно подвешенным в воздухе (или другом газе). От этого и произошло название «воздушные подвесы». В литературе воздушные подвесы иногда называют «пневмоподвесами» или «газостатическими опорами».

В таких опорах повороту шипа вокруг своей оси препятствует только трение о воздух, которое очень мало, что оказывается привлекательными для использования в самых широких отраслях машиностроения и, особенно, в прецизионном механизмах и приборах.

Считалось, что эффект поддержания возникает за счёт импульса струек воздуха, бьющих в поверхность шипа через так называемые отверстия наддува в стенке подшипника. Однако теоретические и практические исследования подтвердили правильность гипотезы Л.Г. Лойцанского, который предположил, что появление подъёмной силы обязано не силам инерции газовых струек, а силам вязкости, возникающим при движении воздуха в тонком зазоре между подшипником и шипом. Из-за этих сил возникают градиенты давления в газовом смазочном слое. Результирующая сил давления и является той подъёмной силой, которая компенсирует нагрузки, действующие на шип, и тем самым предотвращает его касание с подшипником.

3.2.1 Методы расчёта газовых подвесов

К началу 50-х годов XX в. разработчикам приборов с опорами на газовой смазке удалось, по сути, опытным путём сконструировать и изготовить работоспособные образцы воздушных подвесов. Так был создан цилиндрический воздушный подвес (рис. 3.5) с чувствительным элементом (шипом) *1* диаметром $2R = 88$ мм и длиной $L = 92$ мм. Средний радиальный зазор h_0 между чувствительным элементом (ЧЭ) и собственно подшипником 2 (который называют стаканом) был порядка 40 мкм.

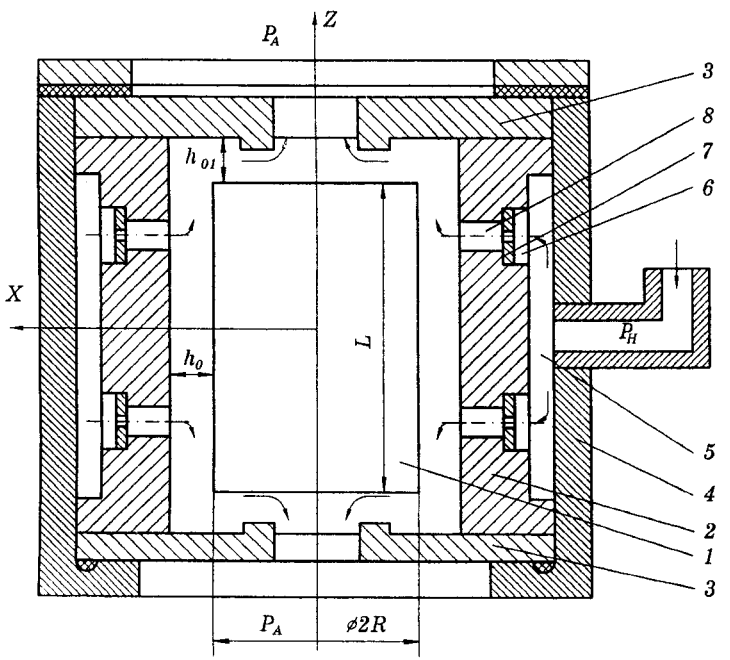


Рис. 3.5 Цилиндрический воздушный подвес
1 — чувствительный элемент (ЧЭ); 2 — подшипник; 3 — крышки подшипника; 4 — корпус; 5 — изолированное от окружающей среды пространство; 6 — дросселирующие устройства; 7 — диафрагма; 8 — карман

Зазор h_{01} между корпусом ЧЭ и крышками *3*, выполнявшими роль упорных подшипников, был несколько больше. Стакан с крышками помещался внутри корпуса *4*, причём между торцами и стаканом было некоторое изолированное от окружающей подвес среды пространство *5*, называемое камерой нагнетания и выполнявшее роль резервуара для воздуха. Из резервуара, в котором поддерживалось постоянное давление $p_н = 2{,}5 \cdot 10^5$ Па, воздух через специальные дросселирующие устройства *6*, размещённые в стенке стакана, поступал в «рабочий зазор» размером h_0, из которого затем выходил через отверстия в крышках в окружающую среду. Величина зазора h в общем случае зависит от двух координат, например, для цилиндрической части — от окружной координаты φ и от продольной координаты z.

Дросселирующие устройства *6* (иногда их называют просто отверстиями или устройствами наддува) представляет собой один из наиболее важных элементов в конструкции подвесов, поскольку от выбора их схемы и параметров во многом зависит работоспособность подвеса.

В подвесе каждое устройство наддува представляет собой отверстие в стенке стакана, в которое была впрессована диафрагма *7* (примерно посередине толщины стенки стакана) с одним или несколькими отверстиями, с суммарной площадью на два порядка меньшей площади диафрагмы. Собственно диафрагма и выполняла роль дросселя. Пространство между диафрагмой и стенкой ЧЭ называется карманом *8*.

Движение воздуха в зазоре между ЧЭ и стаканом (за исключением очень малых областей, прилегающих к отверстиям наддува) имеет ту же природу, что и течение жидкой смазки в подшипнике скольжения, рассмотренное Рейнольдсом в 1886 г. При движении воздушной смазки в подвесе влияние инерционных сил также мало по сравнению с силами давления и вязкими силами, как и в задаче Рейнольдса для несжимаемой смазки. Поэтому и распределение давления в смазочном слое определяется из решений уравнений, являющимися частными случаями одного и того же уравнения,

которое, например, для цилиндрической опоры при стационарном и изотермическом режиме имеет вид:

$$\frac{1}{R^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(h^3\rho\frac{\partial p}{\partial\varphi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(h^3\rho\frac{\partial p}{\partial z}\right)=6\mu\omega R\frac{\partial(\rho h)}{\partial\varphi}, \qquad (3.14)$$

где z и φ — оси цилиндрической системы координат;

p — давление;

ρ — плотность;

μ — коэффициент динамической вязкости;

R — радиус шипа или ЧЭ, $h = h(z, \varphi)$ величина зазора;

ω — частота вращения шипа.

Если рассматривать изотермическое движение несжимаемой смазки ($\rho = const$) в самоподдерживающемся подшипнике, то после сокращения этого уравнения на Р получим классическое уравнение Рейнольдса (1886 г.). В случае движения газовой смазки в цилиндрической части подвеса, с учётом того, что $\rho \sim p$, а скорость поворота ЧЭ очень мала ($\omega = 0$), уравнение (3.14) преобразуется к виду:

$$\frac{1}{R^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial\varphi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial z}\right)=0. \qquad (3.15)$$

Каждое из приведённых уравнений обычно называют уравнением Рейнольдса. Несмотря на сходство дифференциальных уравнений (3.14) и (3.15), задача для подвеса оказалась неизмеримо сложнее задачи Рейнольдса. Отличие заключалось в граничных условиях. В задаче Рейнольдса задаётся давление на границе односвязной области, и задача оказывается линейной. В задаче для подвеса область интегрирования — многосвязна, ограничена контурами выходных отверстий в крышках *3* (рис. 3.5) с заданным на них давлением, равным давлению окружающей среды, и контурами отверстий наддува, на которых надо ставить граничные условия сращивания двух разнородных по своему характеру течений: «медленного» течения в смазочном слое и струйного течения при больших скоростях (иногда превышающих звуковую) в устройствах наддува. Отметим, что число отверстий наддува

в зависимости от модели подвеса доходило до 48, причём, в общем случае все отверстия наддува работают в разных условиях. Многосвязность области интегрирования сама по себе значительно усложняет процесс удовлетворения граничным условиям. Но наибольшую сложность представляет решение задачи о струйных течениях внутри устройств наддува.

Эта проблема была решена В.А. Тарасюком. Им были определены критерии подобия для этого типа опор: параметра давления p_a и коэффициента режима m. Вид этих критериев определяется после приведения задачи (уравнения Рейнольдса и граничных условий) к безразмерному виду.

Так параметр давления p_a определяется как отношение давления в окружающей подвес среде p_a к давлению в камере нагнетания $p_н$. Из условия баланса расходов на отверстиях наддува (или на линиях наддува) получается коэффициент режима:

$$m = 12\ \mu\ \mathrm{M}^*/\pi h_{03} p_н \rho_н, \qquad (3.16)$$

где M^* — критический (максимальный) массовый расход через все диафрагмы;

$\rho_н$ — плотность газа в камере нагнетания.

Благодаря этому, все дальнейшие исследования стационарных режимов работы опор с наддувом различных модификаций, хотя и представляли нередко с математической (в частности, с вычислительной) стороны большие трудности, но физические основы теории таких опор не претерпевали принципиальных изменений.

Моменты увода

Точность и надёжность работы конструкций, использующих опоры скольжения, во многом определяется тем, насколько малы так называемые моменты увода (МУ), создаваемые аэрогидродинамическими силами, которые приложены со стороны смазочного слоя к ЧЭ.

Поэтому довольно быстро встал вопрос о минимизации этих (и без того малых) МУ.

К началу работы над этой проблемой не было по сути чётких представлений о причинах возникновения МУ, кроме, пожалуй, одной. Многочисленные наблюдения привели к заключению, что, по крайней мере, импульсы, создаваемые струйками устройств наддува, вносят «свой вклад» в возникновение МУ. В дальнейшем был установлен ещё ряд факторов, инициирующих появление МУ. Среди них в первую очередь следует выделить один, можно сказать, «особый» фактор. Это смещение ЧЭ цилиндрического подвеса под действием внешних нагрузок.

Особенностью этого фактора является то обстоятельство, что его действие не проявляется только при определённом взаимном положении ЧЭ и стакана, что практически вряд ли осуществимо. К числу «особых» факторов, вызывающих МУ в подвесе, не имеющем никаких дефектов, следует отнести также вибрации ЧЭ и стакана.

Причём эти вибрации могут носить как случайный, так и искусственный характер, предназначенный для увеличения подъёмной силы подвеса (сочетание эффекта наддува с виброэффектом).

Поскольку изготовленные детали опор всегда имеют некоторые отклонения от «идеальной» формы, которые после сборки и в ходе дальнейшей эксплуатации могут увеличиться (иногда очень существенно), то естественно было предположить, что они могут повлиять на МУ.

3.2.2 Методы расчёта газодинамических и гибридных подшипников

Существенным недостатком практически всех типов газовых опор является то обстоятельство, что равновесное положение ротора (ЧЭ) часто оказывается неустойчивым. Причина этого кроется в малой несущей и демпфирующей способности сжимаемого смазочного слоя и неизбежных вынужденных воздействиях на систему, состоящую из ротора (или ЧЭ), смазочного слоя и подшипника (стакана). Анализ ус-

тойчивости равновесия ротора (ЧЭ) на газовых опорах относится к наиболее важному классу нестационарных задач. Эти задачи намного сложнее задач для несжимаемой смазки. Во-первых, потому что уравнение Рейнольдса для газа, как уже отмечалось выше, является нелинейным, во-вторых, потому что время в него входит как переменная интегрирования, а в уравнение для жидкой смазки — как параметр, вследствие чего это квазистационарное уравнение для несжимаемой смазки интегрируется независимо от уравнений динамики ротора (ЧЭ). Уравнение же Рейнольдса для газа, вообще говоря, не удаётся отделить от уравнений динамики ротора, и тогда их решают совместно различными способами. Однако, если воспользоваться методом возмущения, то можно уравнение Рейнольдса привести к квазистационарному виду, и решать независимо от системы уравнений динамики ротора (ЧЭ). Первым из политехников вопросами устойчивости начал заниматься Р.З. Алиев (1968 г.), который использовал, по существу (как и вошедшие затем в его группу И.М. Иванова и В.М. Лыдкин) квазистационарный подход применительно к подвесам. Хотя такой подход и является приближенным, но, основываясь на результатах последующих исследований (Б.С. Григорьева, Д.К. Зайцева, И.Е. Сипенкова), можно утверждать, что он, по крайней мере, не завышает размеры области устойчивости.

Дальнейшее развитие работ по созданию новых, более универсальных, методов расчёта газовых гибридных опор было связано со сферичным подшипником, в котором шаровый ротор не только вращался, но и имел поступательную скорость. Удалось составить программу для интегрирования уравнения Рейнольдса конечно-разностным методом применительно к гибридным опорам с наддувом. В теории смазки было получено решение уравнения Рейнольдса для гибридного сферического гироскопа типа ЗШГ-50 (рис. 3.6) с дискретным наддувом. Предполагая смазку несжимаемой, можно получить точное решение пространственной задачи.

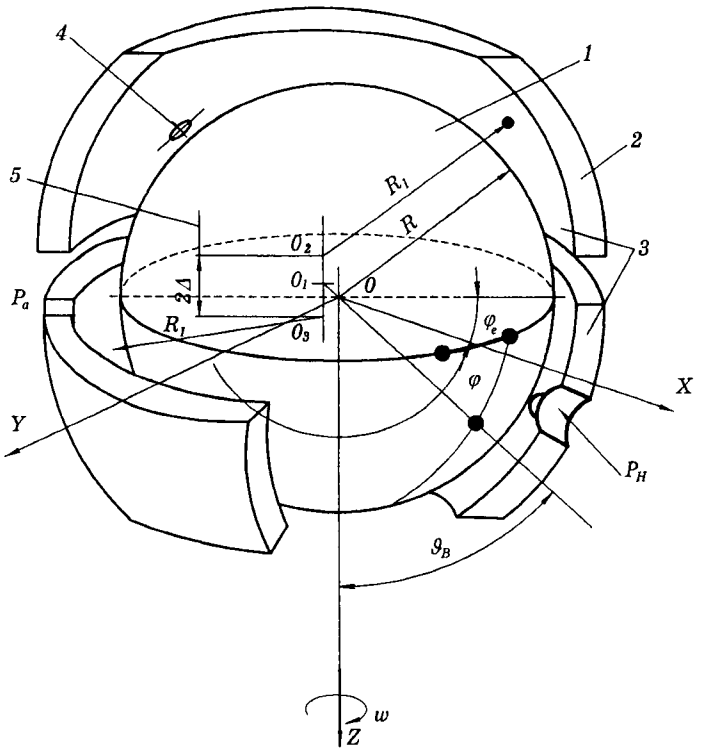


Рис. 3.6 Сферический секторный гироскоп типа ЗШГ-50 на воздушной смазке

Ротор гироскопа *1* представляет собой гладкий шар, а собственно подшипник состоял из двух полусфер *3* с раздвижкой *5* по оси симметрии, и разделенных каждая на четыре одинаковых сектора *2* с отверстием наддува *4* в середине сектора. Наличие так расположенных дискретных отверстий не позволяло применить метод линий наддува. Поэтому Н.Д. Заблоцким и И.Е. Сипенковым был разработан новый метод постановки задачи для опор с наддувом, названный методом неравномерно распределённого наддува. Суть его состояла в том, что стенка подшипника предполагалась как бы пористой, но с неравномерной проницаемостью, причём наиболь-

шая проницаемость приходилась на области, занятые отверстиями наддува.

В пределе можно выбрать такое распределение проницаемости, чтобы функция, её описывающая, была равна нулю во всей области за исключением участков, занятых отверстиями наддува. В этом случае ищется решение задачи уже для односвязной области, которое будет эквивалентным решения задачи для многосвязной области (с дискретным наддувом). Для такой теоретической модели уравнение, аналогичное ранее приведенным вариантам уравнения Рейнольдса, будет содержать дополнительный член, учитывающий принудительную подачу газа через одну из смазываемых поверхностей. Это уравнение можно представить в более общей форме, учитывающей и «эффект клина», и «эффект наддува», а также возможную нестационарность процесса, которая, в частности, позволяет учесть и «виброэффект», если таковой используется для улучшения аэродинамических свойств опоры. Воспользуемся декартовой системой координат x, y, z, направив оси x и z вдоль, а y поперёк смазочного слоя, причём так, чтобы направление оси x совпадало с направлением скорости U_0 относительного движения смазываемых поверхностей. Все величины представим в безразмерной форме, использовав (как это обычно делается в теории смазки) следующие масштабы: для x и z характерный продольный размер опоры L, для y — средний зазор h_0, для продольных u и v составляющих скорости газа — U_0, для поперечной скорости v — $U_0 h_0 / L$, для давления и плотности — давление $p_н$ и $\rho_н$ в камере нагнетания (а если наддува нет, то соответствующие величины в окружающей среде $p_а$ и $\rho_а$), для времени t — некоторый характерный масштаб t_0. Тогда записанный в безразмерном виде аналог уравнения Рейнольдса примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3 p \frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(h^3 p \frac{\partial p}{\partial z}\right)= \\ =\Lambda\frac{\partial(hp)}{\partial x}-m\theta(p)f(x,z)+\sigma\frac{\partial(hp)}{\partial x}, \qquad (3.17)$$

где $f(x, z)$ — заданная функция распределения критического расхода по смазываемой поверхности подшипника, удовлетворяющая условию: $\iint_S f(x,z)\,dxdy = 1$, таким образом, чтобы на всех отверстиях она принимала одно и то же постоянное значение, а в остальной области была близкой или равной нулю.

Образующиеся в этом уравнении комплексы:

$\Lambda = 6\mu U_0 L / p_н h_{02}$ — число сжимаемости;

$m = 12\mu M^* / \pi h_{03} p_н \rho_н$ — коэффициент режима;

$\sigma = 12\mu R2 / h_{02} p_н t_0$ — число сдавливания;

$p = p_a / p_н$ — параметр давления,

являются физическими критериями подобия изотермических задач теории газовой смазки. Критерии Λ и σ выражаются через общие критерии аэродинамического подобия.

Применение обобщённого уравнения Рейнольдса (записанного в сферической системе координат) к решению задачи для гибридной опоры гироскопа ЗШГ-50 позволило определить все необходимые газодинамические характеристики рассматриваемой опоры. Для подтверждения достоверности результатов было использовано аналитическое решение так называемого «вырожденного» уравнения Рейнольдса, являющегося результатом предельного перехода в полном уравнении Рейнольдса при неограниченном возрастании числа сжимаемости.

Анализ результатов расчёта подтвердил ранее установленной на примере решения простейшей модельной задачи неочевидный, на первый взгляд, факт, заключавшийся в том, что *наложение двух эффектов — наддува и клина — не всегда приводит к увеличению грузоподъёмности и даже, наоборот, может её уменьшить.*

Кроме того, в секторных опорах при возрастании числа сжимаемости эффект наддува уменьшается вплоть до полного исчезновения. Что касается влияния коэффициента режима, то здесь тоже наблюдается аномалия, проявляющаяся в

том, что при больших его значениях величина главного вектора сил давления уменьшается.

Обычно, когда речь идёт о сферической газовой опоре, то создаётся впечатление, что это небольшой по размеру подшипник (поскольку он обычно применяется в гироскопии), способный нести нагрузку в пределах нескольких 100 Н. На самом деле встречаются сферические опоры, диаметры которых измеряются метрами, а толщина смазочного слоя имеет величину порядка нескольких сантиметров. Нагрузка, которую выдерживают такие опоры, достигает 1000 Н.

Мы рассмотрели лишь некоторые примеры математических моделей, имеющих важное практическое значение. Однако необходимо иметь в виду, что моделировать и предсказывать процессы, происходящие в природе, лишь детерминистическими методами нельзя, так как вычислительные средства в обозримом будущем не смогут достичь необходимой мощности, а точность имеющихся моделей становится недостаточной для объяснения макроскопических процессов.

3.3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ

В современных условиях триботехническое моделирование является неотъемлемой частью процесса проектирования конструкции и технологии изготовления деталей узлов трения. Немаловажным фактором повышения эффективности современного производства является экономия исходных материалов, в частности, использование малоотходных или безотходных технологий.

Увеличение ресурса, повышение коэффициента полезного действия, снижение периода приработки деталей машин и технологического оборудования находятся в прямой зависимости от параметров поверхностных слоев пар трения и условий смазывания. Неблагоприятные условия трения и смазки, или негарантированное поступление смазки в зону трения приводит к схватыванию взаимодействующих поверхностей и преждевременному их разрушению. Использование

современных технологий получения триботехнических материалов и изделий (порошковая металлургия) [20], а также нанесение современных защитных покрытий и самофлюсующихся материалов методами плазменного напыления, обеспечивают получение различных структур на поверхности трения, включая разветвлённую сеть микропор. Размеры пор определяются технологическими особенностями производства и могут быть сформированы в соответствии с требованиями физической модели триборазрушения.

Использование композиционных материалов на основе меди, железа и графита в сочетании с современными эксплуатационными материалами и набором присадок в зависимости от условий трения позволяет реализовать в узле трения эффект избирательного переноса Гаркунова Д.Н. — эффект безызносности [5].

3.3.1 Общая характеристика подшипников скольжения. Условия существования режимов смазки подшипников

При правильной конструкции и смазке подшипники скольжения могут нести большие нагрузки при высокой частоте вращения. Они имеют малые радиальные размеры и массу, изготовление их не требует специального оборудования. Большим преимуществом подшипников скольжения являются бесшумность и высокая демпфирующая способность при воздействии циклических и ударных нагрузок. Долговечность подшипников скольжения не зависит от частоты вращения (в отличие от подшипников качения, долговечность которых снижается пропорционально повышению частоты вращения).

Тяжелонагруженные и работающие при высокой частоте вращения подшипники нуждаются в непрерывном подводе масла под давлением для поддержания режима жидкостной смазки и отвода теплоты, выделяющейся при трении. Для подшипников тихоходных валов, работающих при небольших нагрузках, достаточна периодическая подача жидкой

или консистентной смазки. В таких случаях нередко применяют самосмазывающиеся подшипники, которые могут работать продолжительное время без подвода смазки.

Подшипники скольжения легко могут быть выполнены разъёмными, что облегчает монтаж и делает их почти единственно возможной формой опор для коренных и шатунных шеек многоколенных валов и в других случаях, когда применение неразъёмных подшипников качения невозможно или затруднительно.

Подшипники скольжения надёжно работают при температуре не выше 150 °С. При более высокой температуре возникает опасность разрыва масляного слоя вследствие разжижения масла. Кроме того, обычные минеральные смазочные масла при высокой температуре быстро окисляются и теряют смазочные свойства. Специальные смазки (синтетические, парафиновые, полифенилэфирные) могут работать при температуре до 300-350 °С.

Вследствие загустевания масла при низких температурах пусковой момент у подшипников скольжения имеет повышенное значение. Недостаток этот особенно ощутим в машинах, работающих на открытом воздухе, которые приходится запускать при минусовых температурах.

Основные режимы смазки в подшипниках скольжения

В подшипниках скольжения встречаются три основных режима смазки: жидкостная (гидродинамическая), полужидкостная и граничная.

При жидкостной смазке поверхности вала и подшипника разделены сплошным масляным слоем; непосредственное трение между металлическими поверхностями вала и подшипника отсутствует. Коэффициент трения при жидкостной смазке незначителен ($f \approx 0{,}001 - 0{,}02$); потери на трение и тепловыделение в подшипнике невелики. Износ металлических поверхностей при этом почти не происходит, поэтому жидкостная смазка является наиболее благоприятной для работы подшипника.

Обязательным условием жидкостной смазки является непрерывная обильная подача масла в подшипник. Давления в масляном слое, необходимые для несения действующих на подшипник нагрузок и предупреждения контакта между металлическими поверхностями, создаются при эксцентричном положении вала в подшипнике в результате непрерывного нагнетания вращающимся валом масла в суживающуюся часть зазора (рис. 3.4). Этот самоподдерживающий процесс создания давления в масляной плёнке носит название гидродинамической смазки.

Полужидкостная смазка может возникнуть в гидродинамических подшипниках, если толщина масляного слоя недостаточна для предупреждения соприкосновения микронеровностей поверхностей вала и подшипника: $h_{min} > Rz_1 + Rz_2$. При полужидкостной смазке сплошность масляного слоя нарушается, поверхности вала и подшипника соприкасаются своими микронеровностями на участках большей или меньшей протяжённости. Этот вид смазки встречается при недостаточной подаче масла или при отсутствии механизма гидродинамической смазки (например, в подпятниках с плоскими несущими поверхностями).

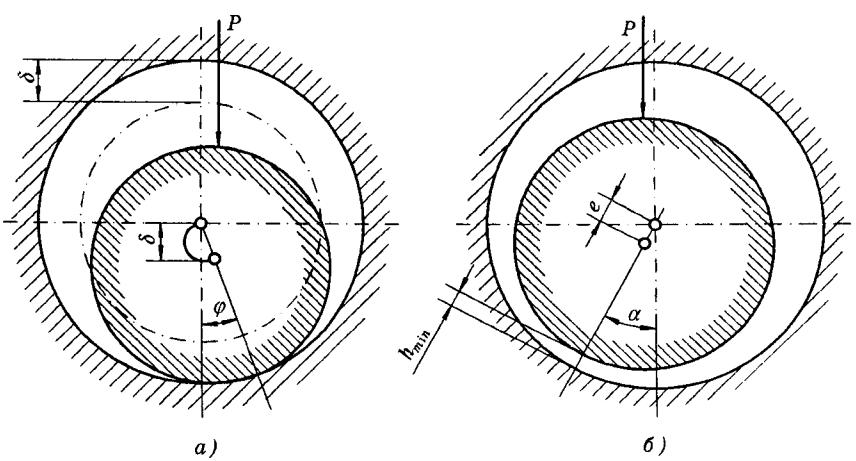
Коэффициент трения f правильно рассчитанных и работающих в условиях жидкостной смазки подшипников скольжения равен 0,001-0,01. Однако при неблагоприятных условиях (высокая вязкость масла, большие окружные скорости, малые зазоры) коэффициент трения возрастает до 0,01-0,03. Коэффициент трения при полужидкостной смазке значительно выше, чем при жидкостной, тепловыделение в подшипнике больше, поэтому возникновение полужидкостной смазки, особенно в подшипниках, работающих при больших частотах вращения, сопряжено с опасностью перегрева и выхода подшипника из строя. Область перехода от жидкостной смазки к полужидкостной характеризуется минимальным коэффициентом трения.

При граничной смазке поверхности вала и подшипника соприкасаются полностью или на участках большой протя-

жённости. Разделительный масляный слой отсутствует. Масло находится на металлических поверхностях только в виде адсорбированной тонкой плёнки. Граничная смазка наступает при недостаточной подаче масла и встречается, например, в подшипниках с периодической или недостаточной подачей смазочного материала, но может возникнуть также в подшипниках жидкостной смазки при расстройстве механизма гидродинамической смазки. Коэффициент трения при граничной смазке благодаря наличию адсорбированного масла меньше, чем сухого, но значительно больше, чем полужидкостного и тем более жидкостного трения. У подшипников, работающих при граничной смазке, коэффициент трения достигает значений 0,1-0,2.

Условия существования гидродинамической смазки

Положение вала на различных режимах работы схематически показано на рисунке 3.7. В пусковой период, когда скорость вращения невелика и преобладает граничная смазка, вал смещается в сторону, противоположную вращению,



а) *б)*

Рис. 3.7 Положение вала на различных режимах работы: а — пусковой период; б — возникновение полужидкостной смазки при увеличении скорости вращения

на угол φ, тангенс которого равен коэффициенту трения граничной смазки.

$$f_{тр} = tg\varphi,$$

где φ — угол трения (рис. 3.7, *а*).

По мере увеличения скорости вращения возникает полужидкостная смазка, коэффициент трения уменьшается, и вал перемещается в сторону вращения до тех пор, пока не произойдёт разделение микронеровностей вала и подшипника слоем смазки (рис. 3.7, *б*).

Вал, установленный в подшипнике с зазором Δ (рис. 3.8, *а*), под действием постоянной нагрузки P занимает положение по обе стороны от точки наибольшего сближения вала и подшипника, а зазор принимает форму клиновидной щели. Вращаясь, вал увлекает с собой масло. Первый слой масла, смачивающий вал, увлекается вследствие адсорбции масла металлической поверхностью вала, последующие слои — вслед-

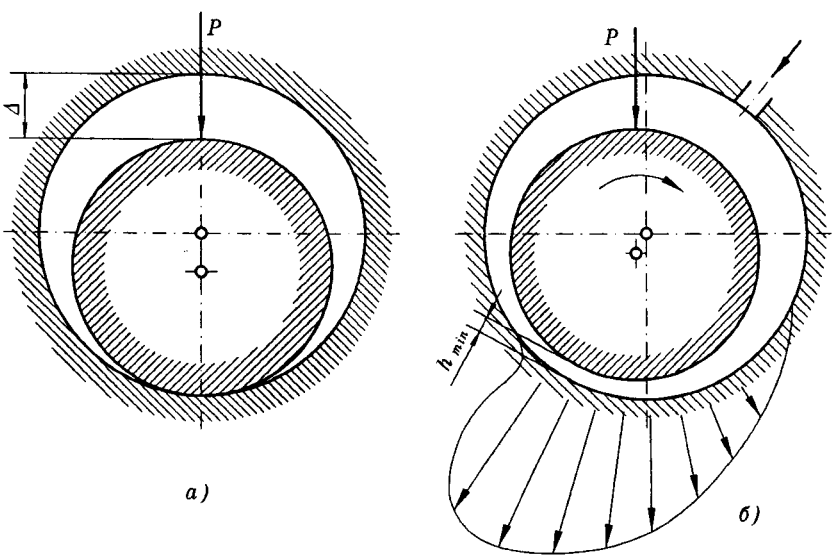


Рис. 3.8 Схема работы вала на различных режимах:
а — эксцентричное положение неподвижного вала;
б — нагнетание масла в клиновидную щель при n > 0

ствие внутренней вязкости масла. Вал, таким образом, действует как насос, нагнетающий масло в клиновидную щель (рис. 3.8, *б*). Зазор h_{min} в точке наибольшего сближения вала и подшипника должен быть достаточным для того, чтобы предотвратить соприкосновение микронеровностей вала и подшипника при возможных колебаниях режима (увеличение нагрузки, уменьшение частоты вращения, падение вязкости масла от перегрева), а также в результате перекосов вала в подшипнике и упругих деформаций вала и подшипника.

В области жидкостной смазки положение центра вала определяется безразмерным параметром χ (хи):

$$\chi = \frac{\omega\eta}{k}, \qquad (3.18)$$

где η — динамическая вязкость масла, Па · с;

ω — угловая скорость, $с^{-1}$;

$k = P/dl$ — удельная нагрузка (d — диаметр; l — длина подшипника), Па.

С увеличением параметра χ центр вала смещается к центру подшипника по траектории, близкой к полуокружности, диаметром, равным радиальному зазору δ. При бесконечно большом значении этого праметра, центр вала совпадает с центром подшипника. При этом толщина масляной пленки $h_{min} = \delta$, клиновидность зазора исчезает, и давление в масляном слое становится равным нулю. Такое состояние может наступить при отсутствии внешней нагрузки.

Валы рекомендуется устанавливать в подшипниках по посадкам: $H7/f7$; $H7/e7$; $H7/e8$; $H7/d8$ или $H7/c8$ [9]. Оптимальный для каждых конкретных условий работы зазор и, следовательно, тип посадки определяют обычно эксперементальным способом.

Средние значения зазоров *Dcp* в диапазоне диаметров валов d = 20 - 250 мм для рекомендуемых посадок ЕСДП, а также безразмерная величина среднего относительного зазора ψ_{cp}, аппроксимируются формулами:

$$\Delta_{cp} = m\sqrt{d}, \quad \psi_{cp} = \frac{\Delta_{cp}}{d} = 10^{-3}\frac{m}{\sqrt{d}}, \qquad (3.19)$$

где d — диаметр, мм;

m — постоянная величина, значение которой определяется из таблицы 2.

Таблица 2

Значение постоянной величины m для рекомендуемых посадок ЕСДП

Посадки	*c*8	*d*9	*d*8	*f*9	*e*8	*f*8	*f*7	*f*6
m	23	21,5	17	13	12	9	7,5	6

Относительным эксцентриситетом ε называют расстояние e центра вала от центра подшипника (рис. 3.9, *б*), отнесенное к радиальному зазору δ:

$$\varepsilon = \frac{e}{\delta} = \frac{2e}{\Delta} \qquad (3.20)$$

где: $\Delta = 2\delta$ — диаметральный зазор.

Относительной толщиной ξ масляного слоя называют минимальную толщину h_{min} масляного слоя в точке наибольшего сближения вала и подшипника, отнесенную к радиальному зазору:

$$\xi = \frac{h_{min}}{\delta} = \frac{2h_{min}}{\Delta} \qquad (3.21)$$

так как: $h_{min} = \delta - e$, то, $\xi = 1 - \varepsilon$.

Относительный эксцентриситет ε и относительная минимальная толщина $\xi = 1 - \varepsilon$ масляного слоя являются функцией отношения l/d длины подшипника к диаметру и безразмерного числа, которое называют критерием Зоммерфельда:

$$S_o = \frac{\eta\omega}{k\psi^2} = \frac{\chi}{\psi^2} \qquad (3.22)$$

где: η — динамическая вязкость масла, Па·с;

ω — угловая скорость, рад/с;

k — удельная нагрузка на единицу несущей поверхности подшипника, Па;

ψ — относительный зазор ($\psi = \Delta/d$).

Теоретическая (хорошо согласующаяся с экспериментом) зависимость между ξ и S_0 показана на рисунке 3.7 для различных значений l/d (с левой стороны графика указаны значения ξ с правой $\varepsilon = 1 - \xi$). Как видно из графика, в области малых S_0 наблюдается прямая пропорциональность между S_0 и ξ. Это — область устойчивой работы подшипника, в которой вал с изменением режима устанавливается в строго определённое равновесное положение.

При некотором значении S_0 (для больших l/d — при $S_0 = 0{,}5 - 2$) кривые ξ претерпевают изгиб, переходя в почти горизонтальные участки. Значения ξ стремятся к единице, нагружаемость подшипника падает, стремясь к нулю при $S_0 = \infty$. У подшипников с малыми l/d перегиб кривых наблюдается при более высоких значениях S_0 (например, для подшипника с $l/d = 0{,}5$ — при $S_0 = 2 - 10$), откуда следует, что такие подшипники устойчиво работают в более широком диапазоне режимов.

Зная (по известным характеристикам η, ω, k, ψ) величину S_0, можно по диаграмме (рис. 3.9) найти значение ξ для данного отношения l/d и определить минимальную толщину масляного слоя (в мкм) из выражения:

$$h_{min} = 0{,}5\xi\Delta = 0{,}5 \cdot 10^3 \ \psi_{ср} d, \qquad (3.23)$$

где d — диаметр подшипника, мм.

Поступая в суживающийся по направлению вращения вала зазор, масло, являющееся практически несжимаемой жидкостью (при обычных в подшипнике давлениях), стремится растечься в окружном и осевом направлениях (к торцам подшипника). Этому препятствуют силы вязкости, в результате чего в масляном слое возникает давление, прогрессивно возрастающее к точке наибольшего сближения вала и подшипника, где истечение масла затруднено из-за малого зазора. Часть масла вытекает через торцы подшипника и в направ-

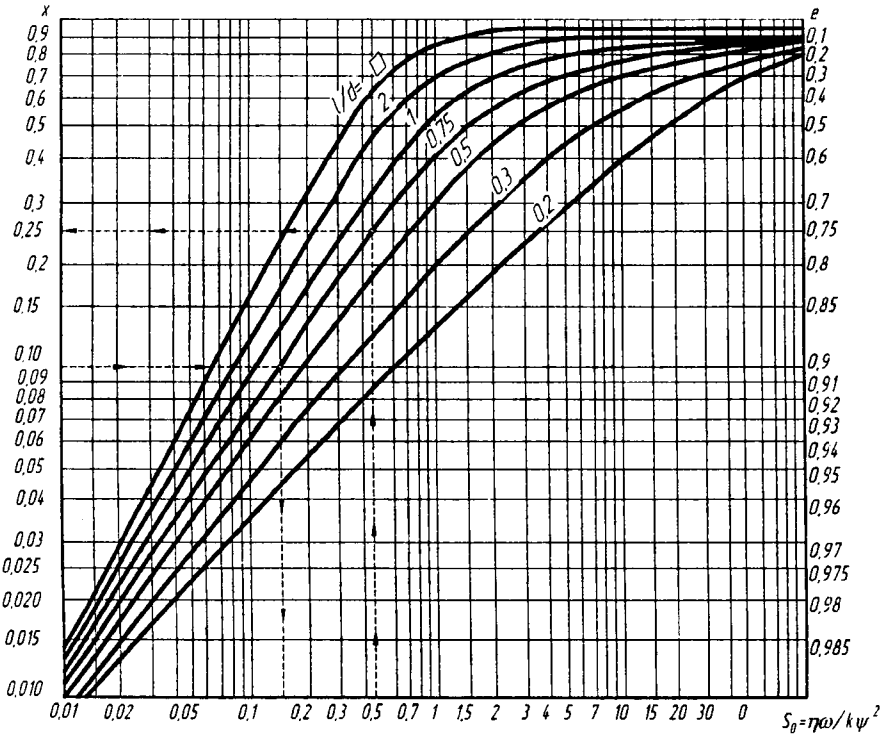


Рис. 3.9 Зависимость между ξ — относительной минимальной толщиной масляного слоя и So — критерием Зоммерфельда

лении, обратном движению вала; оставшаяся же часть должна пройти через самое узкое место зазора. Силы давления, развивающиеся в масляном слое, приподнимают вал, одновременно сдвигая его в сторону направления вращения. Состояние равновесия достигается тогда, когда проходное сечение в самом узком месте щели (h_{min}) оказывается достаточным для пропуска масла, оставшегося после торцового истечения.

Максимальное давление на участке наибольшего сближения вала и подшипника примерно в 2-3 раза превышает сред-

нее давление $k = P/dl$ (где d — диаметр; l — длина подшипника) и может достигать нескольких десятков МПа.

Эпюра давления для различных удельных нагрузок изображена на рисунке 3.10.

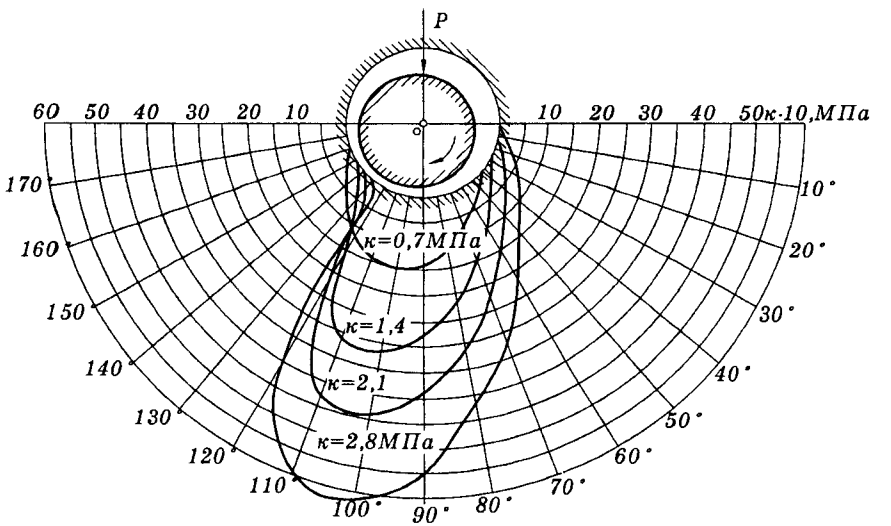


Рис. 3.10 Эпюра давления на участке наибольшего сближения вала и подшипника

3.3.2 Характеристика режима работы. Коэффициент надёжности подшипника

Удельная нагрузка на подшипник ($k = P/ld$) обратно пропорциональна величине So и определяется по формуле :

$$k = \frac{1}{S_o}\frac{\eta\omega}{\psi^2}$$

Для практических расчётов удобнее пользоваться характеристикой режима λ:

$$\lambda = \eta\frac{n}{k} = \frac{S_o\psi^2}{2\pi}, \qquad (3.24)$$

где η — динамическая вязкость, Па·с;

n — частота вращения, $с^{-1}$;

k — удельная нагрузка, Па;

ψ — безразмерная величина относительного зазора.

Параметры работы подшипника определяются численным значением фактора: $\lambda = \frac{\eta n}{k}$ независимо от входящих в него членов. Так, например, высокие значения характеристик режима могут быть достигнуты как увеличением вязкости масла η и частоты вращения n, так и уменьшением удельной нагрузки k. Эта закономерность хорошо подтверждается опытом.

С уменьшением параметра λ вал опускается в подшипнике; толщина масляного слоя h_{min} в точке наибольшего сближения вала с подшипником уменьшается; вытекание масла, нагнетаемого в эту область насосным действием вала, затрудняется, в результате чего давление в масляном слое и жёсткость слоя (отношение действующей силы к перемещениям вала) повышаются теоретически до бесконечности.

Критической характеристикой режима называют значение λ при котором минимальная толщина масляного слоя уменьшается настолько, что наступает соприкосновение микронеровностей вала и подшипника, и коэффициент трения резко возрастает. Толщину масляного слоя, при которой возникает полужидкостная смазка, называют *критической* и обозначают знаком $h_{кр}$.

Зная $h_{кр}$, по уравнению (3.21) можно найти соответствующую величину $\xi_{кр}$, после чего по рисунку 3.9 определить критическое значение $S_{о\,кр}$ и рассчитать по (3.24) $\lambda_{кр}$. Величина $h_{кр}$ для хорошо выполненных гладких и жёстких подшипников и валов составляет в среднем 5-10 мкм.

Коэффициентом надёжности N подшипника называют отношение рабочей характеристики режима к критической:

$$N = \frac{\lambda}{\lambda_{кр}} = \frac{S_o}{S_{o кр}} \qquad (3.25)$$

Эта величина должна быть больше единицы. Чем больше N, тем меньше опасность перехода работы подшипника в область полужидкостной смазки. Если, например, $N = 5$, то рабочая вязкость масла может уменьшиться в 5 раз или нагрузка на подшипник может увеличиться в 5 раз, прежде чем подшипник перейдёт в область полужидкостной смазки.

Пусть: d = 100 мм; l = 75 мм; P = 40 кН; ψ = 0,001 (диаметральный зазор Δ = 100 мкм;

n = 1000 об/мин.; η =25·10^{-3} Па·с).

Удельная нагрузка: $k = \dfrac{P}{ld} = \dfrac{40 \cdot 10^3}{100 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = 5{,}35$ МПа.

Характеристика режима:

$$\lambda = \eta \frac{n}{k} = 25 \cdot 10^{-3} \frac{10^3}{5{,}35 \cdot 10^6 \cdot 60} = 7{,}8 \cdot 10^{-8}.$$

Число Зоммерфельда: $S_0 = 2\pi \dfrac{\lambda}{\psi^2} = 2\pi \dfrac{7{,}8 \cdot 10^{-8}}{10^{-6}} = 0{,}5.$

По рисунку 3.9 (штриховая линия) для l/d = 0,75 находим, ξ = 0,25.

Минимальная толщина масляного слоя:

$h_{min} = 0{,}5 \cdot 10^3 \xi \psi d = 0{,}5 \cdot 10^3 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}001 \cdot 100 = 12{,}5$ мкм

Пусть критическая толщина масляного слоя $h_{кр}$ = 5 мкм.

Критическое значение ξ:

$$\xi_{кр} = \frac{2h_{min}}{\Delta} = \frac{2 \cdot 5}{100} = 0{,}1.$$

Проводя на диаграмме (рис. 3.9) горизонтальную прямую через эту точку до встречи с кривой l/d = 0,75, находим на оси абсцисс $S_{0кр} = 0{,}15$.

Коэффициент надёжности: $N = \dfrac{S_0}{S_{0кр}} = \dfrac{0{,}5}{0{,}15} = 3{,}3.$

Фазы работы подшипника

Фазы работы подшипника отчётливо выявляются на диаграмме, показывающей изменение коэффициента трения f в зависимости от характеристики режима λ. Эти диаграммы, получаемые экспериментально, позволяют определить критический режим работы подшипника и критическое значение минимальной толщины масляной плёнки $h_{кр}$.

На рисунке 3.11 приведён график в координатах λ — f для подшипника диаметром d = 100 мм, с l/d = 1 и относительным зазором ψ = 0,002 (Δ = 200 мкм).

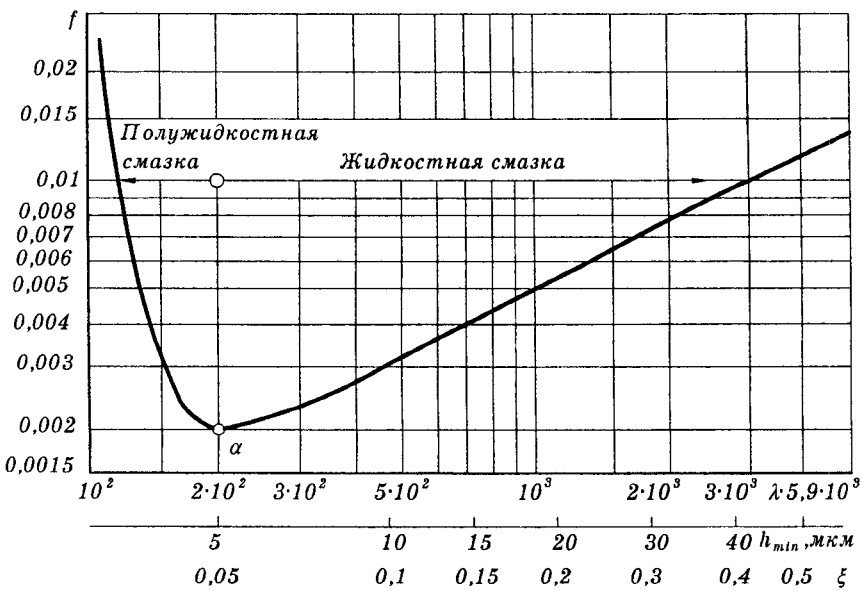


Рис. 3.11 Диаграмма изменения коэффициента трения f в зависимости от характеристики

Левая ветвь кривой относится к области полужидкостной смазки, где наблюдается металлический контакт между поверхностями вала и подшипника.

Крайняя точка кривой (выходящая за пределы диаграммы) соответствует коэффициенту трения при граничной смазке.

Коэффициент трения в области полужидкостной смазки уменьшается с увеличением λ, т.е. для подшипника с заданной удельной нагрузкой и вязкостью масла — с увеличением частоты вращения. Это означает, что по мере увеличения частоты вращения вал отходит от поверхности подшипника; число соприкасающихся микронеровностей уменьшается.

В точке a при $\lambda = 3{,}4 \cdot 10^{-8}$ наступает разобщение металлических поверхностей, вал «всплывает» на масляной плёнке; подшипник переходит в область жидкостной смазки.

За точкой a коэффициент трения определяется гидродинамическими факторами. Коэффициент трения непрерывно повышается с увеличением λ. Минимум кривой указывает критическое значение характеристики режима.

На рисунке 3.12 часть графика 3.11 в координатах $\lambda - f$, который удобней использовать при расчётах.

Минимальная толщина масляного слоя должна быть больше средней суммы микронеровностей вала и подшипника. Главное условие надёжной работы подшипника — уменьшение критической величины промежутка между валом и подшипником, при котором наступает соприкосновение микронеровностей вала и подшипника.

Перечисленные параметры достигаются высокой точностью обработки поверхностей вала и подшипников, соблюдением строгой цилиндричности вала и подшипника, исключением перекосов и деформаций системы и тщательной очисткой масла. Давление вдоль оси в цилиндрически правильном подшипнике изменяется по кривой параболического типа (рис. 3.13, *а*) и резко падает у торцов подшипника в результате истечения масла через торцы. Резкое снижение давления происходит в плоскости расположения кольцевых канавок (рис. 3.13, *д*). Малая шероховатость и правильная цилиндрическая форма поверхности не должны нарушаться при длительной эксплуатации; следовательно, вал и подшипник должны быть максимально износостойкими.

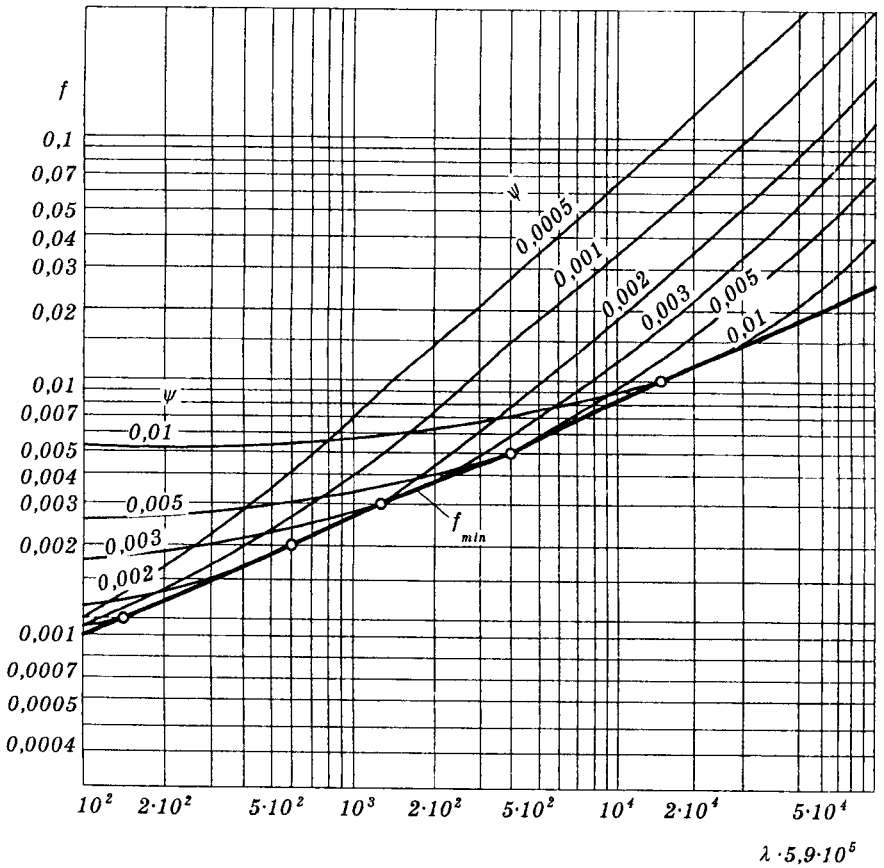


Рис. 3.12 Диаграмма изменения коэффициента трения f в зависимости от характеристики режима λ для различных значений ψ = Δ/d

Предел нагружаемости подшипника зависит также от температуры масляного слоя, что является одним из критериев расчёта подшипников скольжения.

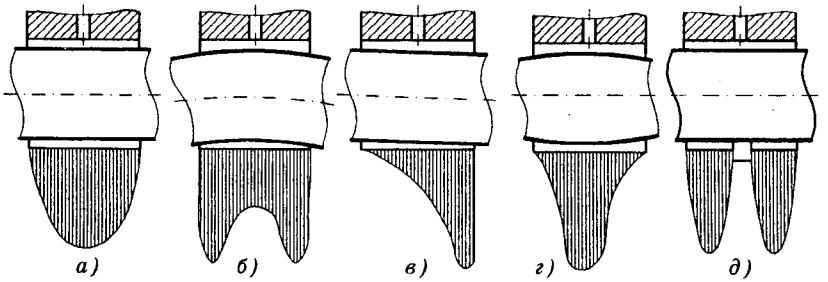


Рис. 3.13 Эпюры давления вдоль оси вала:
а — в цилиндрически правильном подшипнике;
б, в, г — в цилиндрически неправильном подшипнике;
д — в подшипнике с кольцевой канавкой

3.3.3 Влияние геометрических размеров и шероховатости поверхностей на несущую способность подшипника

Диаметр подшипника. Решая формулу (3.24) (для $\xi = 0{,}3$) относительно λ, получаем:

$$\lambda = \eta \frac{n}{k} = 8{,}2 \cdot 10^{-2} \frac{\psi^2 d}{l}. \qquad (3.26)$$

Подставляя в формулу (3.26) значение $k = P/ld$ и значение ψ, находим несущую способность подшипника:

$$P = \frac{12{,}2}{m^2} d^3 \left(\frac{l}{d}\right)^2 \eta n. \qquad (3.27)$$

Это выражение показывает, что при прочих равных условиях (одинаковые параметры η, n, m и l/d) несущая способность подшипника пропорциональна кубу диаметра. Следовательно, увеличение диаметра представляет очень эффективное средство повышения несущей способности подшипника.

Увеличение диаметра не только повышает несущую способность, но при данном значении $h_{кр}$ снижает критическую характеристику режима $\lambda_{кр}$ и, следовательно, увеличивает

надёжность работы подшипника. При увеличении d также повышается жёсткость вала, уменьшаются его упругие деформации (которые в значительной мере определяют критическую толщину масляного слоя) и увеличивается виброустойчивость подшипника.

На рисунке 3.15 показана определённая на основании рисунка 3.13 зависимость $\lambda_{кр}$ от диаметра подшипника d и относительного зазора ψ (принято $l/d = 1$; $h_{кр} = 5$ мкм). Как видно, $\lambda_{кр}$ резко снижается с увеличением диаметра и уменьшением относительного зазора. Применять зазоры $\psi < 0{,}001$ не рекомендуется, так как подшипник при этом переходит в область $\xi > 0{,}3$.

Как следует из рисунка 3.14, значения $\lambda_{кр}$ для подшипников малого диаметра ($d = 20$ - 30 мм) очень велики. Поэтому, такие подшипники могут надёжно работать лишь при высоких характеристиках режима (большие частоты вращения, низкие удельные нагрузки). Как и для подшипников большого диаметра, целесообразно иметь умеренные значения относительного зазора (но не ниже $\psi = 0{,}001$).

По формуле (3.28) можно при заданных P, η, n найти диаметр подшипника, при котором обеспечивается условие $\xi = 0{,}3$:

$$d = 0{,}44 \cdot \sqrt[3]{\frac{Pm^2}{\left(\frac{l}{d}\right)^2 \eta n}} \qquad (3.28)$$

Отношение l/d. Согласно формуле (3.27) несущая способность подшипника пропорциональна квадрату отношения l/d.

Несущая способность подшипников с малым отношением l/d понижена вследствие облегчённого вытекания масла с торцов. При равенстве λ, минимальная толщина масляного слоя у таких подшипников меньше, чем у подшипников с высоким отношением l/d; для создания масляного слоя достаточной толщины необходимы более высокие значения l и меньшие зазоры. Однако подшипники с малым отношением l/d

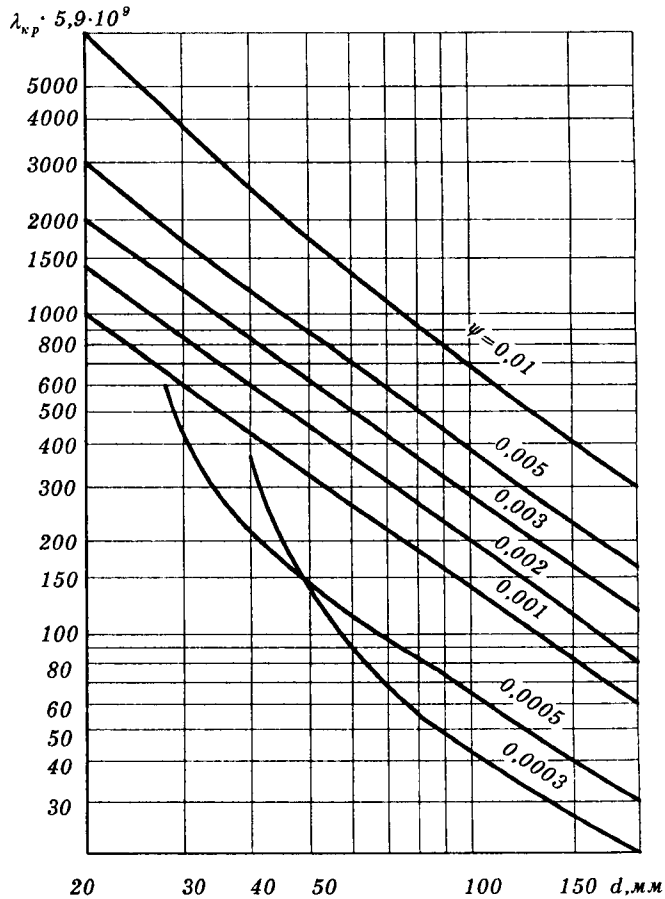


Рис. 3.14 Зависимость $\lambda_{кр}$ от диаметра подшипника d и относительного зазора ψ

менее чувствительны к перекосам; критическая толщина масляного слоя у них значительно меньше, чем у подшипников с высоким отношением l/d. Это в значительной степени компенсирует пониженную несущую способность подшипников с малым l/d.

Подшипники с большим l/d, напротив, очень чувствительны к перекосам, вследствие чего критическая толщина мас-

ляного слоя у них всегда больше. Учитывая положительное и отрицательное влияние l/d на несущую способность, чаще всего придерживаются средних значений $l/d = 0{,}8 - 1{,}2$.

Из-за ограниченных осевых размеров приходится иногда снижать отношение l/d до 0,3. Такие подшипники при правильном выборе остальных параметров (достаточно малые зазоры, высокие значения λ) работают вполне удовлетворительно. Малые отношения l/d применяют также для подшипников больших диаметров ($d > 100$ мм), отличающихся высокой несущей способностью.

Подшипники с $l/d > 1{,}5$, как правило, делают самоустанавливающимися, что позволяет использовать преимущества высоких l/d.

Влияние показателей качества поверхностей

Идеально гладкий и абсолютно жёсткий вал, отделённый от такого же подшипника масляным слоем, ни при каких условиях не может коснуться подшипника. Только отклонения вала и подшипника от правильной цилиндрической формы, вызванные неточностями обработки и упругой деформацией вала и подшипника под действием нагрузки, шероховатость поверхностей вала и подшипника, а также присутствие металлической пыли и других твёрдых частиц износа в масле ограничивают наибольшее сближение вала и подшипника, а следовательно, и несущую способность его. Падение давления в масляном слое и ослабление его несущей способности тем больше, чем больше высота микронеровностей, т.е. чем больше шероховатость поверхностей вала и подшипника.

Отрицательное влияние шероховатости на несущую способность масляного слоя объясняется её дренажным действием. Углубления s между микронеровностями (рис. 3.15, *а*) образуют сеть каналов, по которым масло растекается к торцам подшипника и в окружном направлении. Пока суммарное сечение каналов (приблизительно пропорциональное s) мало по сравнению с сечением масляного слоя h, утечка масла через каналы невелика и не сказывается на несущей спо-

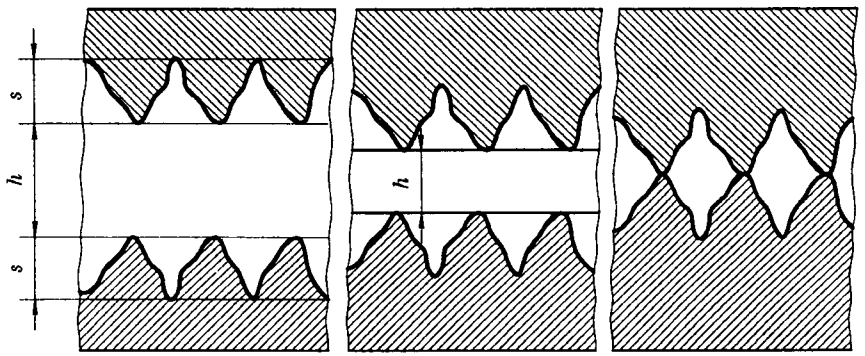


Рис. 3.15 Влияние шероховатости на несущую способность масляного слоя

собности масляного слоя. При уменьшении зазора (рис. 3.15, *б*) утечка через каналы возрастает, и давление в масляном слое перестаёт увеличиваться пропорционально нагрузке. С дальнейшим увеличением нагрузки выступы микронеровностей соприкасаются (рис. 3.15, *в*), и в подшипнике возникает полужидкостное трение. Рекомендуемые значения *Rz* рабочих поверхностей подшипников приведены в [9].

У подшипников, выполненных из мягких и пластичных материалов (баббиты), несущая способность ограничивается наступающим при повышенных температурах размягчением материала и разрушением его под действием высоких давлений в масляном слое еще до возникновения граничной смазки.

3.4 АЛГОРИТМ РАСЧЁТА ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОЙ СМАЗКИ

Расчёт подшипников жидкостной смазки не представляет затруднений, если известны температура масляного слоя и рабочая вязкость масла.

Поверочный расчёт (заданы геометрические параметры подшипника, нагрузка, частота вращения) сводится к опре-

делению минимальной толщины масляного слоя, коэффициента трения и коэффициента надёжности подшипника. По вязкостно-температурной кривой (рис. 3.16) находят вязкость масла при известной температуре, определяют число Зоммерфельда S_o и по графику на рисунке 3.9 определяют относительную толщину масляного слоя ξ.

Минимальная толщина масляного слоя:

$$h_{min} = \xi \frac{\psi d}{2} 10^3 \text{ (мкм)}$$

Значение $\xi_{кр}$ вычисляют по формуле

$$\xi_{кр} = \frac{2h_{кр}}{\Delta} = 10^{-3} \frac{2h_{кр}}{\psi d} \text{ (мкм)}$$

После чего, по той же диаграмме, находят соответствующее значение $S_{o\,кр}$ и определяют коэффициент надёжности как отношение $S_o/S_{o\,кр}$.

Критическую характеристику режима $\lambda_{кр}$ определяют по тем же графикам на основании величины $h_{кр}$. Величина $h_{кр}$ зависит от качества обработки поверхностей, длины и диаметра подшипника, жёсткости системы вал — подшипник и прирабатываемости материала подшипника.

Коэффициент надёжности $\chi = \lambda/\lambda_{кр}$.

При параметрах шероховатости поверхности $Ra = 0{,}08$ - - 0,32 мкм величину $h_{кр}$ можно определять из ориентировочного соотношения:

$$h_{кр} = a \cdot \sqrt{\frac{l}{d}} \cdot \sqrt{d}\,, \qquad (3.29)$$

где d — диаметр вала, мм;

a — коэффициент, равный для подшипников с баббитовой заливкой 0,7, с заливкой свинцовой бронзой 1, подшипников из бронзы и алюминиевых сплавов 1,5.

Для многоопорных валов (например, коленчатых) значения $h_{кр}$, определённые по формуле (3.29), следует увеличивать в 1,2–1,5 раза.

При *проектировочном расчёте* задаются нагрузка и частота вращения. Нередко по конструктивным условиям задан диаметр вала. Отношение l/d обычно принимают равным 0,8-1 (за исключением специальных случаев).

Задача сводится в большинстве случаев к нахождению зазора ψ, обеспечивающего наиболее надёжную работу подшипника.

Простейший расчёт состоит в определении величины ψ из условия $\xi = 0{,}3$. При выбранном диаметре вала и отношении l/d и при данном сорте смазочного материала определяют характеристику режима $\lambda = \eta \frac{n}{k}$, после чего находят оптимальный зазор ψ по графику на рисунке 3.14. Затем подбирают ближайшую стандартную посадку с таким расчётом, чтобы при крайних значениях ψ, определяемых полем допусков, максимальное значение ξ с учётом износа в эксплуатации составляло ~ 0,4, причём не выходило за пределы 0,1-0,5.

Возможно также варьирование характеристики режима путём изменения вязкости масла (подбор смазочного материала).

Для облегчения подбора посадки построена номограмма, устанавливающая связь между относительными зазорами при стандартных посадках и величинами ξ, (график составлен для $l/d = 1$ и применим для значений $l/d = 0{,}8$-- 1,2).

Пусть, например, $d = 80$ мм, характеристика режима $\lambda = 17 \cdot 10^{-8}$. Восстанавливая из точки $d = 80$ мм (в левой или правой части графика) перпендикуляр до встречи с крайними значениями ψ при различных посадках и проводя через точки встречи горизонтальные линии до пересечения с ординатой $\lambda = 17 \cdot 10^{-8}$ в средней части графика, читаем на наклонных линиях соответствующие значения ξ.

В рассматриваемом случае ближайшей подходящей посадкой является посадка $H7/e8$, при которой для среднего значения $\psi = 0{,}0014$ (точка a), крайнего верхнего $\psi = 0{,}0023$

(точка *б*), крайнего нижнего $\psi = 0{,}0007$ (точка *в*) значения ξ, соответственно равны 0,3; 0,15; 0,7 (точки *а'*, *б'*, *в'*).

Приемлема также посадка H7/d8 (соответственно $\xi = 0{,}18$; 0,09; 0,45). Посадка $H7/c8$ даёт слишком низкие значения ξ(0,1; 0,075; 0,2), при которых возможно появление полужидкостной смазки.

Недопустимы посадки $H7/f7$ (ξ = 0,65; 0,27; 0,85) и $H6/f6$ (ξ = 0,75; 0,45; 0,87), переводящие подшипник в неустойчивую область.

Средние и крайние значения h_{min} определяют из выражения:

$$h_{min} = 0{,}5 \cdot 10^3 \, \xi\psi d \text{ (мкм)},$$

где ξ — относительная толщина масляного слоя;

ψ — относительные зазоры при среднем и крайних значениях зазоров.

Значение $h_{кр}$ находят по номограммам (рис. 3.9) на основании принятого значения $\lambda_{кр}$. Коэффициент трения по формуле (3.32).

Результаты расчёта по средним и крайним значениям зазора для предыдущего примера (посадка $H7/e8$; $h_{кр} = 5$ мкм) приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расчётные значения параметров зазора

Зазор	ψ	δ, мкм	ξ	h_{min}, мкм	$\lambda_{кр}$ $5{,}9\times10^9$	χ
Средний	0,0014	56	0,3	16,5	200	5
Максимальный	0,0023	92	0,15	14,7	320	3,1
Минимальный	0,0007	28	0,7	19,6	120	8,4

Расчёты коэффициента трения при жидкостной смазке

Окружная сила T, противодействующая вращению вала, равна сумме сил вязкого сдвига масла в зазоре по всей окружности вала. По закону вязкого трения Ньютона при ламинарном течении сила T пропорциональна поверхности сдвига (т.е. величине πdl), вязкости масла η, скорости сдвига V и обратно пропорциональна толщине h масляного слоя.

При концентричном расположении вала толщина масляного слоя $h = 0{,}5\Delta$, скорость сдвига $V = 0{,}5\omega d$. Следовательно,

$$T = \frac{\pi dl\eta\omega d}{\Delta} = \frac{\pi dl\eta\omega}{\psi} \tag{3.30}$$

Коэффициент трения при жидкостной смазке

$$f = \frac{T}{P} = \frac{\pi dl\eta\omega}{P\psi} = \pi\frac{\eta\omega}{k\psi} \tag{3.31}$$

Это известная формула Петрова, справедливая при расположении вала, близком к концентричному ($S_0 \geq 1$; $h \approx 0{,}5\Delta$).

Заменяя в формуле (3.31) выражение $\frac{\eta\omega}{k\psi^2 0}$ на S_0, получаем формулу коэффициента трения:

$$f = \pi S_0\psi \tag{3.32}$$

При $S_0 < 1$ формула дает уменьшенные значения f.

При эксцентричном расположении вала ($S_0 < 1$) коэффициент трения определяют по формуле Фогельполя:

$$f = \pi\sqrt{S_0\psi} \tag{3.33}$$

Резкое увеличение f при малых l/d объясняется не возрастанием трения (числитель в формуле $f = T/P$), а снижением несущей способности P подшипника. При значениях l/d, близких к единице, достаточно точно:

$$f = 20\frac{\lambda}{\psi} + 0{,}5\psi \tag{3.34}$$

Дифференцируя выражение (2.26) по ψ и приравнивая производную к нулю, находим минимальный коэффициент трения при $(d/l) = 1$

$$f = 6{,}3\sqrt{\lambda} \tag{3.35}$$

На рисунке 3.13 показаны значения f в подшипник для различных соотношений гидродинамических факторов. Значения f_{min} показаны жирной линией. (Диаграмма Герси — Штрибека).

Относительный зазор, при котором коэффициент трения минимален,

$$\psi_{f_{min}} = 6{,}3\sqrt{\lambda}\,. \qquad (3.36)$$

т.е. численно равен минимальному коэффициенту трения.

В пределах $l/d = (0{,}3 - 1{,}5)$ кривые $\psi\xi = 0{,}3$ аппроксимируются формулой

$$f_\xi = 0{,}3 = 7{,}7\sqrt{\lambda} + 0{,}5\psi\,, \qquad (3.37)$$

где $\lambda = \eta\dfrac{n}{k}$ (η — вязкость масла при рабочей температуре подшипника, Па · с);

n — частота вращения вала, об/с;

k — удельная нагрузка на подшипник, Па;

d и l — размеры подшипника, м .

Приближённые критерии несущей способности

Нередко при проектировании подшипников исходят из расчёта допустимой удельной нагрузки $k = P/ld$. Этот критерий применим только для мягких, малопрочных подшипниковых материалов (баббиты, пластики), и то с большими допущениями. Действительная несущая способность зависит от конструкции подшипника, его жёсткости, способа нанесения антифрикционного слоя, геометрических параметров (зазора, отношения l/d), характера нагрузки, частоты вращения вала, количества подаваемого масла и других факторов.

Рассмотрим подшипники с баббитовой заливкой. Предел выносливости баббита на сжатие, определённый на испытуемых образцах, равен ~ 20 МПа при 20 °С и 10 МПа при 100 °С. Учитывая, что максимальное давление в масляном слое превышает среднее удельное давление примерно в 3 раза, следовало бы, исходя из этих данных, считать допустимой удельной нагрузкой при 20 °С, $k = 0{,}3 \cdot 20 = 6$ МПа, а при 100°С $k = 0{,}3 \cdot 10 = 3$ МПа.

Действительную несущую способность подшипников можно резко повысить, уменьшая толщину слоя заливки, увели-

чивая жёсткость вкладышей и постелей, правильно выбрав зазор и отношение l/d. Рационально сконструированные подшипники с тонкослойной баббитовой заливкой безопасно выдерживают при циклическом нагружении удельную нагрузку k = 10 - 15 МПа.

При расчёте подшипников из более прочных материалов (бронзы, алюминиевые сплавы, серебро) решающими являются гидродинамика подшипника, его геометрические (d, l/d, ψ) и режимные (λ) факторы, рациональный выбор которых позволяет довести удельные нагрузки до 15-30 МПа, а в отдельных случаях до 50-60 МПа .

В качестве критерия тепловой напряжённости подшипников нередко применяют величину kV (произведение удельной нагрузки, МПа, на окружную скорость вала, м/с). Предельными считаются значения kV = 40 - 60.

Применение этого критерия совершенно не обосновано. Конечным мерилом тепловой напряжённости является температура масляного слоя, которая устанавливается в результате взаимодействия тепловыделения и теплоотвода от подшипника. Тепловыделение пропорционально $kVldf$ (а не kV) и поддаётся регулировке в широких пределах путём подбора геометрических параметров и режима работы подшипника. Теплоотвод, в свою очередь, зависит от геометрических и режимных факторов и может быть резко увеличен проточной циркуляцией масла, введением охлаждающих канавок и повышением давления подачи масла. Таким образом, критерий kV не может служить даже для приближённой оценки работоспособности подшипника.

Эффективный способ снижения рабочей температуры подшипника — усиление теплоотвода путём подвода масла под давлением (принудительная циркуляционная смазка) с одновременным увеличением зазора и введением дренажных канавок в ненагруженной зоне подшипника.

При повышении температуры подшипника масло может разжижиться до такой степени, что создание устойчивого масляного слоя достаточной толщины станет невозможным. Вязкость

смазочных масел резко изменяется с температурой. Так, например, вязкость индустриального масла 45, при 20 °С равная $\eta = 0{,}35$ Па·с, (рис. 3.16) падает при 150 °С до (2-3) 10^{-3} Па · с, т.е. более чем в 100 раз. При температуре 150 °С у большинства масел начинают испаряться летучие составляющие.

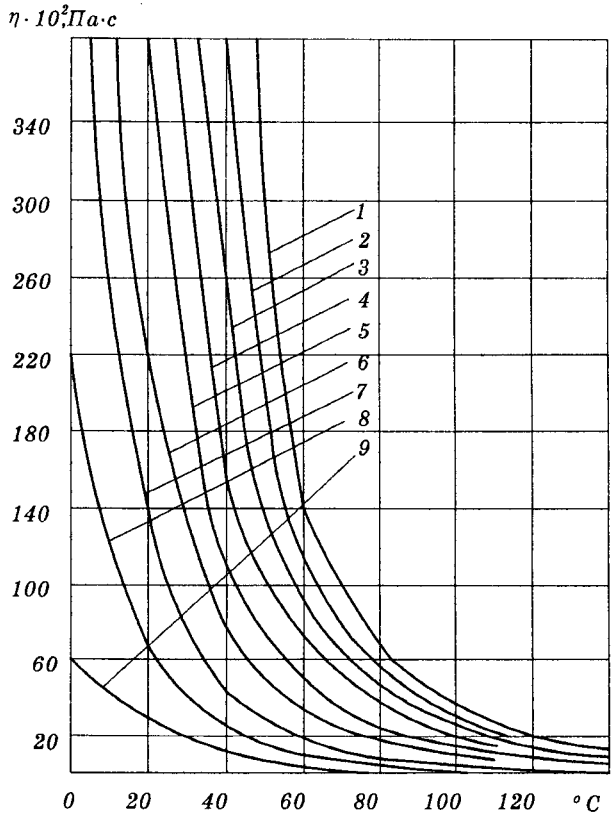


Рис. 3.16 Вязкостно-температурные характеристики масел: 1 — Авиационные МК-22; 2 — МС-20; 3 — ИС-14; 4 — Автотракторное АК-15; 5 — Индустриальные И40А; 6 — И30А; 7 — И20А; 8 — И12А; 9 — Веретённое И8А

Это явление сопровождается образованием паровых мешков и нарушением сплошности масляного слоя. Кроме того, резко усиливается окисление масла. Масло теряет смазоч-

ные качества; происходит осмоление и выделение твёрдых продуктов окисления (коксование масла). Таким образом, рабочая вязкость масла — основной показатель работоспособности подшипника.

Контрольные вопросы

1. Какие дополнительные силы возникают в процессе виброабразивной обработки (ВиАО) металлов, обусловленные воздействием вязко-пластичной жидкости?
2. Каково назначение математической модели, которая описывает механику взаимодействия двух тел, разделённых слоем СОТС при виброабразивной обработке?
3. Запишите параметры, составляющие комплексный безразмерный показатель аналоговых уравнений Рейнольдса для вязкопластичной смазки.
4. Какие параметры, входящие в комплексный безразмерный показатель гидродинамического влияния СОТС на процесс финишной обработки, являются управляемыми факторами?
5. Какие величины оказывают существенное влияние на глубину внедрения абразивного инструмента?
6. Каков механизм возникновения гидродинамического давления в зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемым изделием?
7. Запишите уравнение Рейнольдса, которое позволяет определить давление, возникающее в гидравлическом клине.
8. В чём заключается эффект поддержания шипа в воздушном подшипнике согласно гипотезе Л.Г. Лойцанского?
9. Каковы причины возникновения моментов увода в пневмоподвесах?
10. Назовите основные особенности и преимущества подшипников скольжения.
11. Перечислите основные режимы смазки в подшипниках скольжения.
12. Каковы условия существования гидродинамической смазки?

ГЛАВА 4. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОБЛЕМАМ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ

4.1 СИНЕРГЕТИКА И ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Взаимодействие технологических систем с предметом производства на любом из технологических переходов может подчиняться законам синергетики. Синергетикой называют науку о создании или возникновении самоорганизующихся систем или сред. При определённых обстоятельствах система (например, технологический процесс) начинает обладать свойствами, отличными от её свойств в прошлом.

В качестве примера рассмотрим важную проблему технологии машиностроения связанную с технологическим наследованием. Знание основных закономерностей технологического наследования не всегда позволяет активно пресекать передачу вредных наследственных свойств от операции к операции. До сегодняшнего времени в качестве основных барьеров для такого пресечения рассматривались термические операции, что ограничивает управление технологическими процессами их совершенствование.

Снятию указанных ограничений может способствовать использование различных синергетических эффектов, проявляющихся при реализации технологических процессов (ТП) изготовления изделий машиностроения. Говорят, что технологическая система или среда «теряют память». Это означает, что отрицательные свойства изделий не будут передаваться на последующие операции. Поэтому в арсенале технологических методов формирования свойств изделий появляются новые методы активного воздействия на среду.

При изготовлении заготовок, например, методами литья особенно чётко проявляются наследственные связи в технологической цепочке «шихта — заготовка». Такое наследование представляется вполне естественным. Режимы заливки,

т.е. заполнение соответствующей формы, прямо связаны со свойствами литой заготовки. К таковым относятся: скорость заливки, температура, скорость охлаждения. Если, например, изменить скорость заливки при литье под давлением, то появление новой (большой) скорости следует рассматривать как бифуркацию, которая приводит к новой самоорганизации частиц заготовки. Это появление не только новых более высоких механических свойств, но и возникновение во многих случаях пористости на поверхностных слоях отливки. Следовательно, в аттракторе прочности (если рассматривается формирование этого свойства) указанная бифуркация сыграла положительную роль, а в аттракторе шероховатости поверхностных слоёв, бифуркация сыграла отрицательную роль.

В качестве бифуркации следует также рассматривать воздействие на заливаемый материал магнитного поля. Наследственные свойства шихты играют, безусловно, решающую роль, но для свойства электропроводности отлитого материала, используемого для дальнейшего изготовления фольги, возникшая бифуркация весьма важна. Желаемое свойство формируется в аттракторе электропроводности. При этом в других аттракторах может происходить снижение показателей качества. Часты случаи, когда бифуркация, вызывая «потерю памяти», приводит к одновременному появлению целого ряда положительных свойств. Так, в случае изготовления фольги увеличивается не только электропроводность, но и коррозионная стойкость.

Технологические системы являются динамическими — развивающимися во времени. Л.Эйлер впервые установил, что указанные системы в определённый момент времени эксплуатации могут испытывать такую нагрузку, при которой дальнейшая эволюция системы проходит по совершенно другому сценарию. Этот момент называют точкой бифуркации или бифуркацией. Бифуркация может возникнуть как при наличии вызывающей силы, так и при прекращении её действия. Развитие системы во времени происходит в опреде-

лённом аттракторе, т.е. в канале эволюции. Так, например, износ инструмента проявляется в своём, определённом аттракторе. По окончании периода стойкости инструмента техническая система подходит к точке бифуркации, после прохождения которой развивается по направлению, приводящему к выходу технологической системы из строя.

В то время как происходит накопление условий для выхода из строя инструмента, в других аттракторах ничего подобного не происходит и не возникают условия для бифуркаций. Как показал Л. Эйлер, в момент бифуркации система (и технологическая в частности) «лишается памяти», т.е. отсекает всю предысторию, проявляющуюся в наследовании свойств. Следовательно, бифуркация есть барьер, способный, в принципе, отсечь влияние вредных свойств.

В момент бифуркации и постбифуркационный период поведение системы принципиально непредсказуемо и определяется совершенно новыми условиями, которые до бифуркации, возможно, не играли никакой роли. После возникновения бифуркации трудно сказать что-либо определённое о постбифуркационном периоде, поскольку нельзя прогнозировать поведение технологической системы, но можно говорить о тенденциях эволюции системы. Последнее принципиально важно для технологии машиностроения, так как технологов интересует не только возведение барьеров против передачи вредных свойств, но и оценка поведения системы по её важнейшим показателям.

Такие ситуации особенно интересны для технологических систем. Может быть использована целая серия ограничений, имеющих самую различную природу. Так, в случае использования прецизионной технологической системы могут быть одновременно ограничены температуры, силы, химические компоненты, их концентрация (например, СОТС) и другие. Таким образом, имеется способ для возведения барьеров в ходе технологического наследования. Суть этого способа состоит в создании самоорганизующихся систем, которые «теряют память». После установления барьера (или барьеров) в

постбифуркационном периоде можно управлять поведением технологической системы, совершенствуя с помощью технологических императивов показатели качества создаваемого объекта.

При механической обработке заготовок резанием основная масса их материала изменений не претерпевает. Такие изменения уже произошли на этапе изготовления собственно материалов и исходной заготовки. При механической обработке основные процессы самоорганизации касаются размеров, формы и взаимного расположения поверхностей, а также поверхностного слоя заготовок и деталей. Механизм передачи свойств изделий от одной технологической операции к другой ещё не раскрыт в должной мере.

Если в одном аттракторе развивается свойство, определяющее соответствующий показатель качества изготавливаемого изделия, то в другом аттракторе развивается (или не развивается) другое свойство. Так, жёсткость технологической системы, представляющая собой отношение силы к соответствующему упругому перемещению элемента оборудования, например, шпинделя станка, зависит от количества подшипников в опоре. С увеличением количества подшипников жёсткость шпиндельного узла увеличивается, но затем система перестаёт реагировать на увеличение числа подшипников и жёсткость узла уже не изменяется. Здесь возникла бифуркация, система перестала зависеть от управляющей силы и стала самоорганизующейся. Заранее определить значение жёсткости не представляется возможным. Это можно сделать для каждого конкретного случая экспериментальным путём.

Бифуркацию нельзя рассматривать как мгновение. Эффект мгновенности в технических системах может означать относительную кратковременность действия, поскольку каждая причина для своей реализации на практике требует некоторого времени. Когда используется термин «точка бифуркации», то из этого не следует, что бифуркация происходит мгновенно. Собственно бифуркация требует времени. Такое утверждение должно в полной мере использоваться в техно-

логии машиностроения. Понятие теплового удара, например, может рассматриваться с одной стороны как мгновение, но с другой стороны — как процесс нарастания теплоты в зоне удара абразивного зерна о заготовку, и этот процесс требует времени.

Технологические системы, в свою очередь, являются развивающимися элементами других систем более высокого иерархического уровня. Каждая система развивается в своём аттракторе. У каждого аттрактора могут быть свои «цели развития». Совместное развитие называют «коэволюцией». Развитие одной из подсистем не препятствует развитию всей системы. Можно, например, выделить систему «шлифовальный круг — заготовка» и увидеть, что при определённых скоростях или подачах возникает бифуркация и заготовка получает прижоги. Но это обстоятельство может никак не влиять, например, на износ направляющих станка — это другая система (или подсистема). В целом же коэволюция системы нарушается. Возникает системный кризис. Можно утверждать, что и, наоборот, системный кризис приводит к бифуркации, перестройке и смене аттрактора.

Постбифуркационное состояние системы принципиально непредсказуемо. Можно установить определённые запреты на функционирование технологической системы таким образом, чтобы коэволюционное состояние не было нарушено. Поэтому целесообразно ввести понятие «технологический императив», т.е. запрет на нежелательные условия функционирования системы в постбифуркационном периоде. Ограничения должны быть оговорены в технологических регламентах. Так, технологическим императивом может быть ограничение температуры, давления, влажности, скорости и пр. При шлифовании технологическим императивом может быть, например, скорость резания, при которой не произойдёт ни возникновение прижогов заготовки, ни осыпание шлифовального круга. Какой именно императив установить — решает технолог. Но для этого необходимо отчётливо осознать всю совокупность элементов системы, взаимодействующих друг с другом.

Те технологические системы, которые можно рассматривать как диссипативные, способны переходить при определённых условиях от упорядоченного движения к движению, называемому хаотическим. Согласно принципу Бора такой переход происходит, когда перестаёт действовать причина, организующая упорядоченное движение, в качестве которой могут, например, выступать сила или момент силы, действующие на технологическую систему. Аналогичный эффект может вызвать не исчезновение причины, а изменение условий нагружения, скорости и т.д.

На рисунке 4.1 представлена технологическая система, предназначенная для изготовления изделия *1*, совершающего движение *Dr*.

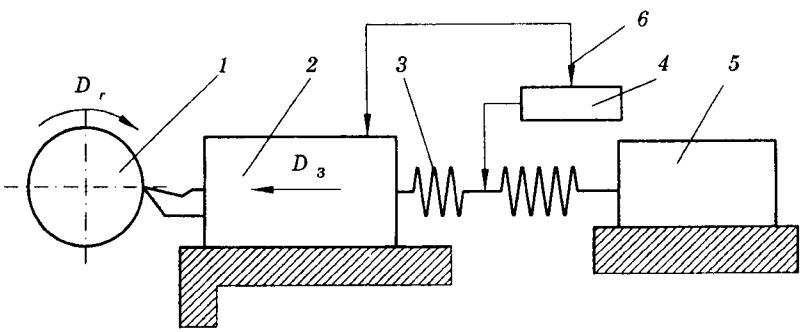


Рис. 4.1 Схема самоорганизующейся технологической системы

Режущий инструмент перемещается (подача *Ds*) вместе с суппортом *2*. Движение суппорта создаётся двигателем *5* через механизмы *3*, а управляющие сигналы задаются программным устройством *4* или обратной связью *6*. Чем ближе к объекту подходит инструмент, тем меньше становятся его перемещения, обеспечивающие качество (точность размера) изделия. При этом сила резания, обеспечивающая движение суппорта, становится малой. Суппорт перестаёт отрабатывать команды программного устройства и в соответствии с положениями синергетики начинает совершать хаотические дви-

жения. Технологическая система становится самоорганизующейся, и в общем случае предсказать её поведение принципиально невозможно.

В описанной ситуации перемещения суппорта уменьшаются (рис. 4.2), а в момент времени t_0 возникает бифуркация и начинает функционировать новая система хаотического движения. Так хаос порождает новое свойство. С технологических позиций необходимо далее ограничить значение Δ, в рамках которого может совершаться движение суппорта. Это связано с достижением параметров качества изделия.

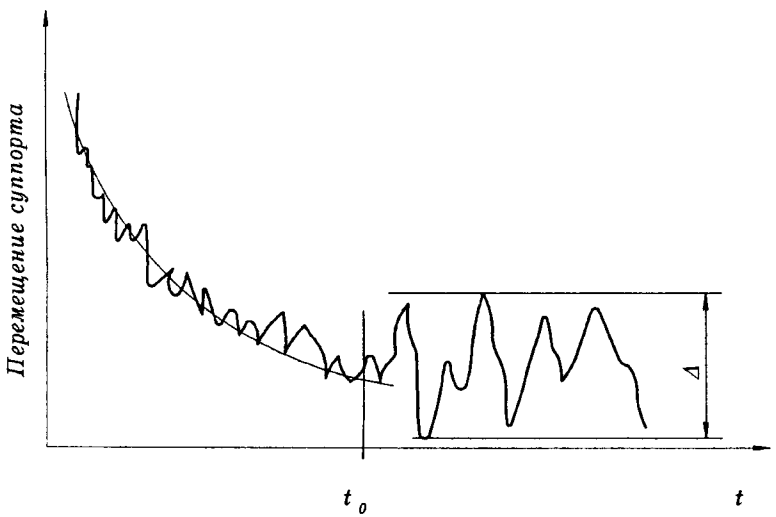


Рис. 4.2 График упругого перемещения суппорта в ходе функционирования технологической системы

При прецизионной обработке геометрическая точность изготовленного изделия может оцениваться микрометрами и их долями, различные наследственные свойства здесь уже перестают играть решающую роль, поскольку основным становится движение суппорта в новых условиях. Можно считать, что возник своеобразный барьер на пути передачи наследственных свойств изделия.

Фактор случайности в проблеме функционирования самоорганизующихся технологических систем играет исключительно важную роль. Их диссипативность уже предполагает случайность, которая выступает как общая характеристика функционирования сложной технологической системы, хотя в каждый момент времени поведение системы определяется действием законов физики и химии.

В связи с рассмотрением поведения самоорганизующихся систем в постбифуркационный период возникает вопрос об их устойчивости. Ещё Эйлер показал, что всякая система может находиться в квазиустойчивом состоянии вне зависимости от того, внешняя или внутренняя нагрузка на неё действует. Забыв свою предысторию, технологическая система как динамическая может перейти из одного состояния в другое с помощью очередной бифуркации. При этом, вероятнее всего, технологическая система окажется в определённых границах неустойчивой. Эту ситуацию специалисты синергетики описывают образно, утверждая, что никто не видел карандаша, стоящего на острие. Прогнозируя появление барьеров технологического наследования, необходимо предполагать, что самоорганизующаяся технологическая система может переходить из одного состояния в другое, и в то время, когда развитие в одном аттракторе не будет устойчивым, в другом будет наблюдаться устойчивое развитие.

Анализируя состояние устойчивости в технологических системах, необходимо заметить, что устойчивость (упорядоченность) движения проявляется в крупных масштабах, а случайность — в малых масштабах на уровне флуктуации. Если перемещается суппорт металлорежущего станка, то, образно говоря, он имеет «цель развития», т.е. наблюдается его упорядоченное движение, но в каждый момент времени можно констатировать и случайные контакты микровыступов суппорта и направляющих, контакты определённых зон, связанных с отклонениями формы направляющих и пр. Так проявляется антагонистическое взаимодействие упорядоченности (устойчивости) и случайности. Несмотря на непредс-

казуемость в общем виде поведения технологической системы, представляется возможным корректировать его. Для этого вводят технологический императив, т.е. запрет на функционирование системы, категоричное требование к нему и пр. При этом самоорганизация системы в целом и в отдельных аттракторах не должна быть нарушена.

Уточнения в каждом конкретном случае могут быть введены после более глубокого изучения поведения системы. Необходимо установить рамки, в которых развивается самоорганизующаяся система. При шлифовании, например, прецизионных изделий нужно ограничить зазоры в суппортных группах, скорости и подачи, определить требования к фундаментам оборудования, к химическому составу охлаждающих сред и ряд других требований вплоть до технологического регламентирования поведения исполнителей процесса. Другие технологические рамки обеспечат постбифуркационный процесс, отличный от первого лишь количественно, но не качественно. Разумное использование синергетических эффектов в технологии машиностроения, безусловно, способствует повышению показателей качества машиностроительной продукции.

4.2 САМООРГАНИЗАЦИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

4.2.1 Общие сведения о самоорганизации в узлах трения

Примером устойчивой самоорганизующейся системы может являться работа подшипника жидкостной смазки в различных условиях. Подшипники скольжения устойчиво работают в широком диапазоне эксплуатационных режимов. Это объясняется их способностью приспосабливаться к различным условиям работы благодаря свойству смазочных масел изменять вязкость с изменением температуры.

Большие зазоры неблагоприятны для несущей способности, но способствуют уменьшению трения и увеличению прокачки масла. Рабочая температура подшипников с большим зазором меньше; повышенная благодаря этому вязкость масла компенсирует их малую несущую способность. Этим объясняется способность подшипников скольжения работать даже при довольно значительных износах.

Подшипники с малым зазором вследствие повышенного тепловыделения работают при высокой температуре; однако пониженная вязкость масла компенсируется свойственной этим подшипникам высокой нагружаемостью. Аналогичную способность саморегулирования подшипник проявляет и при колебаниях рабочего режима.

Если, например, возрастает удельная нагрузки, то характеристика режима падает, а с ней уменьшается и минимальная толщина масляного слоя; подшипник приближается к режиму полужидкостной смазки. Однако с понижением относительной толщины масляного слоя — ξ (гл. 2) одновременно падает коэффициент трения и снижается тепловыделение. В результате повышается вязкость масла, отчего прежнее значение характеристики режима полностью или частично восстанавливается, и подшипник переходит в состояние устойчивого равновесия.

Если повышается температура подшипника (например, из-за временного уменьшения подачи масла), то рабочая вязкость масла падает, толщина масляного слоя уменьшается, и может произойти заедание. Однако с понижением вязкости падает коэффициент трения и уменьшается тепловыделение. В результате устанавливается новое состояние равновесия, хотя, может быть, и с пониженным против первоначального значения характеристики режима работы подшипника λ (гл. 3).

При переходе в область высоких значений λ работа подшипника может стать неустойчивой из-за уменьшения эксцентриситета вала. Однако при возникновении вихревых движений вала резко возрастают потери на трение, температура

подшипника повышается, вязкость масла падает, и вал возвращается в устойчивую область.

Таким образом, фактор η — вязкость масла, в выражении $\eta n/k$ играет роль регулятора, который стремится при изменении характеристики режима восстановить её первоначальное значение. Главное условие заключается в том, чтобы механизм восстановления равновесия мог действовать во всём диапазоне возможных колебаний режима, без перехода опасных значений h_{min}. Для этого нужно, чтобы подшипник был рассчитан с достаточным коэффициентом надёжности и работал в области достаточно больших эксцентриситетов.

В противоположность жидкостной смазке область полужидкостной смазки является неустойчивой. Если подшипник переходит в эту область, то всякий фактор, способствующий снижению величины λ (уменьшение вязкости масла, увеличение нагрузки), вызывает повышение коэффициента трения, увеличение температуры подшипника, снижение λ и, следовательно, новое увеличение коэффициента трения. Процесс завершается возникновением граничной смазки, если только не появится какой-нибудь благоприятный фактор (например, у пластичных подшипниковых материалов сглаживание микронеровностей под действием повышенных температур, сопровождающееся снижением $h_{кр}$).

Благоприятно сказывается в области полужидкостной смазки повышение частоты вращения. С увеличением n (а следовательно, и λ) коэффициент трения резко падает, и подшипник переходит в область жидкостной смазки. Этим объясняется сравнительно безопасный переход подшипников через область полужидкостной смазки в пусковые периоды.

В поисках новых путей повышения износостойкости деталей машин целесообразно обратиться к живой природе. Анализ нагруженных подвижных сочленений живых существ показывает, что имеются два типа узлов трения — открытые и закрытые. Открытость и закрытость здесь понимается не в термодинамическом понятии, а в смысле попадания на трущиеся поверхности абразивных частиц, влаги, пыли и дру-

гих веществ. В открытых узлах трения работает твёрдый материал по твёрдому — это зубы животных. Закрытые узлы трения — суставы живых организмов, «сконструированные» на принципах, которые в машиностроении не применяют. На твёрдой кости располагается мягкий хрящ, на поверхности которого имеется тонкая подвижная полимерная плёнка. Сопряженная поверхность имеет такую же структуру. В суставе работают два одинаковых материала, причём мягкий по мягкому. Суставы здорового человека имеют коэффициент трения 0,001...0,03, что много ниже коэффициента трения в гидродинамических радиальных подшипниках или в прецизионных подшипниках качения. Хотя поверхность хряща сустава и имеет шероховатость, в процессе нагружения сустава и его движения площадь фактического контакта в результате смятия шероховатостей близка к 100 %. Сравним работу сустава человека и пары трения бронза—сталь в режиме избирательного переноса.

Анализ приведённых схем показывает, что имеется достаточно чёткая внешняя аналогия между работой сустава живого организма и пары трения бронза—сталь в режиме избирательного переноса. Эта аналогия лишь внешняя. В действительности механизм работы сустава живого организма в тысячи раз сложнее. Заметим, что подобные пары трения (у мыши, слона, рыбы, птицы) являются универсальными узлами, обладающими «безызносностью».

Известно, что биологические системы обладают способностью к самовосстановлению и могут работать десятки лет без износа.

Долгое время существовало как бы противоречие законов развития живой и неживой природы. Основной закон термодинамики Клаузиуса предсказывает рост энтропии, т.е. беспорядка в замкнутой системе. Эволюционная теория Дарвина, наоборот, устанавливает, что в основе отбора лежит повышение степени организованности биологических систем. Однако в последние десятилетия биологическая эволюция стала рассматриваться с кибернетических позиций и поня-

тий автоматического регулирования и обратной связи, что в значительной степени сблизило эти два закона развития мира. Помимо сказанного основную роль в указанном сближении следует отвести спонтанному формированию структур в открытых системах на молекулярном уровне. Сейчас установлено, что в открытых системах, которые постоянно получают из внешней среды отрицательную энтропию и вещество, могут возникать стационарные неравновесные состояния с высокой степенью упорядоченности. В соответствии с термодинамикой неравновесных процессов новые структуры могут возникать в природе в тех случаях, когда выполняются следующие четыре необходимых условия:

1) система является термодинамически открытой, т.е. может обмениваться веществом m (или) энергией E со средой;

2) динамические уравнения системы нелинейные;

3) отклонения от равновесия превышают критическое значение;

4) микроскопические процессы происходят кооперативно (согласованно).

Второй закон термодинамики связан с первым условием: в системах, способных формированию структур, он не нарушается, а лишь проявляется в более общем виде. Второе и третье условия указывают, что нужно отойти от привычных линейных физических представлений и вступить в нелинейную область, где при определённых условиях упорядочение может наступить самопроизвольно. Четвёртое условие отражает причинность образования процессов, идущих на микроскопическом уровне, при наличии особых связей, которые ведут к спонтанному возникновению структур.

Во многих явлениях неживой природы явно отсутствуют какие-либо признаки самоорганизации, наблюдается распад системы и увеличение энтропии. Так, кусок обычного сахара, выставленный на воздух, через некоторое время испаряется, исчезает. Обратного явления не происходит, сахар «из ничего» не образуется. След самолёта в небе из конденсиро-

ванных паров воды также вскоре рассеивается, пропадает. Подобных примеров множество.

Самоорганизация не является универсальным свойством материи и существует лишь при определённых внутренних и внешних условиях. Вместе с тем это свойство не связано с каким-то особым классом веществ. Узел трения в неживой природе может удовлетворять требованиям самоорганизации. Он представляет собой открытую систему. К нему подводится энергия от электродвигателя, вращающего механизм, или от двигателя внутреннего сгорания. Как правило, узлы трения смазываются. Смазочный материал состоит из множества одинаковых элементов, в данном случае — молекул. В нём могут быть мицеллы, ионы металлов. Всё это создаёт условия для самоорганизации новых структур.

До последнего времени считалось, что трение является разрушительным процессом. Обратное утверждение считалось абсурдом, как и то, что можно создать узел, который бы не изнашивался. В следующем разделе будет показано, что трение может быть созидательным процессом и безызносность — это реальный процесс.

4.2.2 Явление безызносности при трении

Поскольку в инженерной практике имеется большое количество разнообразных материалов, применяемых в узлах трения, их сочетания могут быть весьма обширны. Если ещё учесть то обстоятельство, что в процессе работы свойства материалов изменяются (в зависимости от условий трения и применяемых смазочных материалов, которых также имеются тысячи), то число физико-химических изменений на трущихся поверхностях и их интенсивность, от которых зависят величины износа и силы трения, может быть бесконечным и предусмотреть их все практически невозможно. Достаточно, например, алюминиевожелезистоникелевой бронзе при 4 % железа и 4 % никеля увеличить содержание алюминия с 10 до 11 %, как произойдёт образование хрупких

структур в сплаве, что резко снизит износостойкость пары бронза—сталь [19]. Можно привести многочисленные примеры, когда незначительное отклонение от технологического процесса изготовления деталей узлов трения приводило к образованию задиров на поверхностях трения и выходу деталей из строя. Антифрикционность узла трения, как уже было сказано, зависит от двух сопряженных деталей и смазки. Выполнены и ежегодно выполняются тысячи научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в числе которых:

— разработка новых износостойких и антифрикционных материалов и покрытий, а также смазочных материалов для узлов трения;
— изучение влияния шероховатости и волнистости поверхности на первоначальный износ деталей узлов трения, надёжность и энергетические затраты;
— определение оптимального состава конструкционных и антифрикционных материалов применительно к конкретным узлам трения машин и оборудования, которые обеспечивали бы минимальные потери на трение, высокую износостойкость и надёжность работы;
— оценка совместимости различных материалов в парах трения с точки зрения схватывания поверхностей, переноса материала с одной поверхности трения на другую, их износостойкости и потерь на трение;
— исследование прирабатываемости материалов, продолжительности этого процесса, оценка оптимальных режимов приработки, возможности использования приработочных покрытий, разработка различных технологических приёмов и специальных приработочных присадок к маслам и приработочных масел;
— изучение изменений в поверхностных слоях трущихся деталей в результате действия пластической деформации, температуры и окружающей среды и влияние этих изменений на антифрикционные свойства пар трения;

— изучение различных видов изнашивания и их закономерностей (окислительного изнашивания, водородного, коррозионно-механического, фреттинг-коррозии и др.);
— изучение механизма разрушения поверхностей трения материалов при трении скольжения и контактной усталости материалов в подшипниках качения, зубчатых передачах и кулачковых механизмах, определение влияния различных факторов (твёрдости поверхности, вида финишной обработки, типа смазочного материала и др.) на контактную выносливость узла трения; разработка расчёта трущихся деталей на трение и износ.

Естественно этим не исчерпываются все направления по изучению процессов трения, изнашивания и смазки в машинах. Их большое разнообразие связано с тем, что в процессе работы узла трения трущиеся материалы имеют непосредственный контакт. С каждым годом разрабатываются всё новые износостойкие и антифрикционные материалы и, для того чтобы оценить их служебные свойства, требуется проведение большого количества экспериментальных исследований. Изменения первоначальных свойств материалов в эксплуатации машин практически непредсказуемы, и это не даёт возможности заранее что-либо предвидеть. Налицо огромная разрозненность направлений исследовательских работ в области триботехники и, как результат, малая их эффективность. Возникает вопрос: как выйти из этого положения?

Обеспечение безызносной и длительной работы узла трения сводится к созданию между трущимися деталями металлической плёнки, отделяющей одну поверхность от другой. В этом и состоит главная задача триботехники. При решении такой задачи многие исследования, которые проводились в течение ряда лет во многих странах, становятся ненужными. К ним могут быть отнесены исследования по прирабатываемости; влиянию на трение и износ шероховатости поверхностей; взаимодействию различных пар трения (име-

ется в виду механическое и молекулярное взаимодействие); изменениям на поверхностях трения от пластической деформации, температуры и окружающей среды; процессам разрушения поверхностей трения и др.

Направление исследований по разработке безызносных узлов трения, моделирующих узлы, созданные природой, можно назвать *натуртриботехникой*. Эти исследования в данное время находятся на первой стадии развития. В натуртриботехнике на первый план выступают следующие исследования:

1. Создание условий в узле трения, при которых образуется сервовитная плёнка.
2. Изучение смазочного действия сервовитной плёнки в узле трения.
3. Исследование структуры сервовитной плёнки в зоне контакта деталей при её деформации, длительности работы сочленения в зависимости от вида смазочного материала, условий работы и среды.
4. Изучение самоорганизующихся процессов в зоне фрикционного контакта.

Натуртриботехнику можно отнести к самостоятельному направлению в области конструирования, изготовления и эксплуатации машин и оборудования.

Отметим, что главным постулатом классической триботехники является то, что трущиеся материалы при работе всё время между собой контактируют и находятся в состоянии насильственного контакта. В натуртриботехнике главный постулат другой. Здесь трущиеся материалы не имеют непосредственного контакта между собой, их разделяют металлическая сервовитная плёнка и серфинг-плёнка, которые образуются в процессе трения [5].

4.2.3 Формирование свойств композиционных материалов

Благодаря достижениям современной науки и технологии, а также более глубокому пониманию физических, хи-

мических и биологических взаимодействий различных веществ на наноуровне появилась возможность получения материалов и изделий с заданными свойствами, то есть удовлетворяющих конкретным требованиям потребителя. Такими свойствами обладают композиционные материалы. Цель создания композитов — достичь комбинации свойств, не присущих каждому из исходных материалов в отдельности.

Под *композиционным материалом* понимают объёмное монолитное искусственное сочетание разнородных по форме и свойствам двух или более материалов (компонентов), с четкой границей раздела, использующее преимущество каждого из компонентов и проявляющее новое свойство.

Композиционные материалы представляют собой сложные гетерогенные (контактируемые материалы с различным химическим составом), термодинамические, открытые, неравновесные системы, поэтому для научного прогнозирования и управления свойствами конечного материала необходим современный синергетический подход и учёт процессов самоорганизации.

При создании композиционных материалов руководствуются условиями совместимости компонентов. Для получения композитов с оптимальными свойствами межфазное взаимодействие должно быть ограничено, поскольку интенсивное взаимодействие приводит к ухудшению механических свойств композиционного материала.

Для того, чтобы композит обладал стабильными свойствами при повышенных температурах, его компоненты должны быть *химически совместимы*. Понятие химической совместимости включает понятие термодинамической и кинетической совместимости. *Термодинамическая совместимость* — способность матрицы и армирующих элементов находиться в состоянии термодинамического равновесия неограниченное время при температуре получения и эксплуатации. *Кинетическая совместимость* — способность компонентов находиться в состоянии метастабильного равновесия, контролируемого такими факторами, как адсорбция, скорость диффузии, скорость химических реакций.

Наряду с химической совместимостью при создании композита важно обеспечить физико-механическую совместимость, то есть совместимость упругих констант, коэффициентов термического расширения и показателей пластичности компонентов, позволяющих достигнуть прочности связи в процессе передачи напряжений через границу.

К *физическо-механическим свойствам* композиционных материалов при их создании относят упругие и прочностные свойства.

Упругие свойства. Преимущество волокнистой арматуры состоит в высокой прочности и возможности создания упрочнения в том направлении, в котором это требуется по конструктивным соображениям, что обеспечивает максимальное использование свойств волокон. Недостатком нитевидной формы является то, что волокна способны эффективно передавать нагрузки только в направлении своей оси, тогда как в перпендикулярном направлении упрочнение это часто отсутствует, а в некоторых случаях может даже произойти разупрочнение. Матрице отводится роль защитного покрытия, предохраняющего волокна от механических повреждений и окисления.

Прочностные свойства. Главная функция границы раздела композита — передача нагрузки между упрочнителем и матрицей, определяется механическими требованиями к поверхности раздела при различных методах нагружения. Матрица должна обеспечивать прочность и жёсткость композиционной системы при действии растягивающей или сжимающей нагрузки как в осевом направлении, так и в направлении перпендикулярном к армирующим элементам. Матрица также должна обеспечивать прочность и жёсткость системы при действии растягивающей или сжимающей нагрузки в направлении, перпендикулярном к армирующим элементам.

На рисунке 4.3 представлена схема типового технологического процесса производства изделий из композиционного материала методами порошковой металлургии.

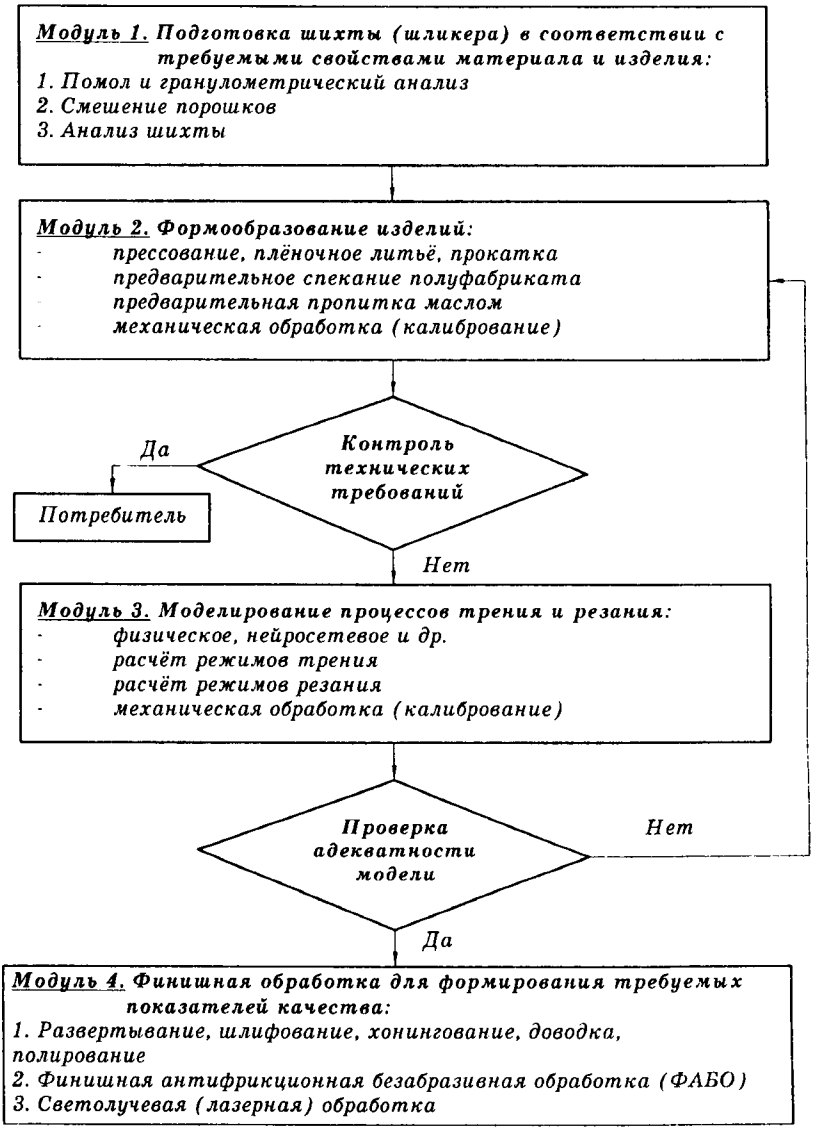


Рис. 4.3 Производство изделий из композиционного материала

Методологической основой получения материалов с заданными свойствами являются принципы *синергетики*, в соответствии с которыми эффективное управление свойствами материалов и их оптимизация возможны только в условиях самоорганизации структур.

Самоорганизация в системе связана с формированием структуры, более сложной, чем первоначальная. Движущей силой образования таких структур в физико-химических системах могут быть градиенты температур, давлений, химических или электрохимических потенциалов, внешних электрических и магнитных полей. Например, когда начинается процесс кристаллизации в переохлаждённом расплаве на зародыше, то энергия системы изменяется в двух противоположных направлениях: увеличивается за счёт образования новой поверхности раздела, т.е. за счёт поверхностного натяжения, и уменьшается за счёт выделения теплоты кристаллизации. Оба эти процесса нелинейны, и если их характеристические времена оказываются близкими друг к другу, то возникают благоприятные условия для взаимосогласованного поведения частей системы и образования в ней упорядоченных диссипативных структур при кристаллизации.

Роль границ раздела и межфазных явлений ещё более возрастает при уменьшении размеров композита. В частности, нанометровая шкала приводит к необходимости создания таких неодинаковых структур, в которых границы раздела могут иметь атомный масштаб. Перспективным методом прецизионного синтеза твёрдых тел является метод молекулярного наслоения, основная идея которого состоит в последовательном наращивании монослоёв структурных единиц заданного химического состава — метод эпитаксиального роста.

Уже первые попытки исследования и практического использования структур с размерами менее 100 нм показали, что поведение таких наноструктур качественно отличается от поведения тел с большими размерами. Малость линейных размеров, хотя бы в одном измерении, кардинально меняет

характер квантовых состояний электронов, ярко проявляя свойства, присущие системам пониженной размерности. При этом существенно изменяется сама идеология электронной техники. На первый план выдвигаются свойства отдельных квантовых состояний, а не потоков огромного числа электронов. Поэтому создание, исследование и применение структур с линейными размерами меньше чем 100 нм рассматривается как особое направление в физике, технологии и электронной технике — *наноэлектроника*. Наноэлектроника является основой информационных систем XXI в.

Композиты, у которых один или несколько структурных параметров (кристаллическое зерно, химическая неоднородность по объёму, толщина слоя в многослойных покрытиях, диаметр волокна) имеют размер не превышающий 100 нм относят к *наноструктурным материалам*. Достоинство нанокристаллического материала заключается в том, что он обнаруживает уникальные упругие, прочностные, пластические, магнитные, электрические, трибологические и другие свойства.

Наступивщий XXI век — век новых материалов и технологий, век создания композиций с прогнозируемыми свойствами, что в значительной степени связано с использованием новых физико-химических приёмов формирования поверхности заданного химического состава и строения с атомно-молекулярной точностью («атомарная сборка»). Необходимость дальнейшего прогресса в этой области заставляет исследователей «погружаться» в самые глубокие проблемы квантовой механики и физики твёрдого тела. Надёжность производства микро- и нанокомпозитов должна быть очень высокой на всех стадиях технологического процесса. Поэтому получение принципиально новых характеристик искусственных композиционных структур, основанных на квантовых эффектах, явлении самоорганизации, невозможны без создания новых прецизионных синтетических процессов и разработки новых подходов к их анализу.

4.3 СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

4.3.1 Основные сведения о наукоёмких технологиях в машиностроении

Современное понятие «технология» трактуется как совокупность управленческих, научно-исследовательских, опытно-конструкторских и инжиниринговых процессов, являющаяся фундаментом продуктивной деятельности людей. Это более широкое понятие, чем «совокупность методов средств по переработке сырья, материалов, полуфабрикатов, изделий и т.д. в материальном производстве». Оно также предполагает важную роль человеческого фактора и отраслевых технологий: промышленных и оборонных, транспортных и коммуникационных, ресурсосберегающих и природоохранных, информационных и гуманитарных и т.п.

Промышленные технологии как основные принципы получения новых материалов, изделий с заданными функциональными свойствами, построения производственных процессов и их эффективного надёжного функционирования оказывают решающее влияние на жизнь человеческого общества, во многом определяют области и способы деятельности людей, открывают новые возможности гармонизации жизни и творчества человека с окружающей природой в глобальных масштабах. Собственно глобализация стала порождением развивающихся технологий. Именно технологии (особенно информационные, транспортные, коммуникационные, аэрокосмические) разрушили иллюзию представлений о бесконечных земельных просторах и дали много доказательств тому, что мир тесен.

Процесс глобализации приводит к объединению усилий всё более широкого круга предприятий. Каждое из них концентрируется на своей основной компетенции, в результате чего параллельно в разработке участвуют:

— главное предприятие-разработчик;
— поставщики систем и компонентов;
— производители станков и оборудования;
— научно-исследовательские институты.

Изделия машиностроения, поставляемое в условиях жёсткой конкуренции на внутренний и внешний рынок, должно обладать новым уровнем свойств и отвечать всевозрастающим требованиям, предъявляемым потенциальным потребителем к функциональным, экологическим и эстетическим свойствам. Это ведёт к зарождению новых отношений между альянсами производителей, в том числе мировыми.

Эти тенденции повышения требований к качеству изделий нашли своё отражение в международных стандартах ISO-9000. Получение такого уровня изделий всё больше связывают с нетрадиционными конструкторскими и технологическими решениями, реализация которых не всегда возможна на основе использования традиционных технологий. В связи с этим всё большее внимание специалистов привлекают нетрадиционные технологии, созданию которых предшествует накопление обширных данных фундаментальных и прикладных наук. В отличие от традиционных, чаще аналоговых, такие технологии называют «наукоёмкими», «прецизионными», «ультрапрецизионными», «нанотехнологиями».

Независимо от используемой терминологии, все эти технологии объективно образуют составляющие единого, самостоятельного направления в рамках общей технологии машиностроения, суть которого более полно отражается в понятии *высокие технологии* (рис. 4.4).

Основные признаки высоких технологий:
— наукоёмкость;
— системность;
— физическое и математическое моделирование с целью структурно-параметрической оптимизации;

— высокоэффективный рабочий процесс размерной обработки;
— компьютерная технологическая среда и автоматизация всех этапов разработки и реализации;
— устойчивость, надёжность и экологическая чистота;
— наличие самообучающихся систем искусственного интеллекта в процессах конструирования, планирования и сборки;
— нетрадиционное использование физических, химических и других эффектов и явлений;
— применение прецизионного оборудования, оснастки, инструмента, систем диагностики.

Рис. 4.4 Структурно-логическая модель понятия «Высокие технологии в машиностроении»

4.3.2 Комбинированные методы обработки

В последние годы сложился новый подход к формированию нетрадиционных технологий путём их взаимного комбинирования. Это привело к созданию новых, так называемых комбинированных методов обработки. Цель разработки таких методов — возможность создания процессов обработки, которые обеспечивают требуемые качественные показатели изготавливаемых деталей.

Такой подход позволил разработать около 20 новых видов комбинированных процессов. Теоретический анализ показывает, что уже при современном уровне развития науки и техники возможно проектирование около 800 высокоэффективных способов обработки, большинство из которых пока неизвестно [16].

Комбинация типовых методов обработки — путь получения новых технологических процессов. Комбинированные методы обработки являются сочетанием различных технологических приёмов, в каждом из которых пытаются использовать и усилить положительные признаки, необходимые для технологического процесса изготовления детали. При различном сочетании магнитного, химического, механического (постоянного или импульсного) и теплового воздействий создана Целая гамма комбинированных методов обработки (их около 20), тогда как существует реальная возможность разработки примерно 800 таких видов. В качестве признаков, подлежащих усилению, может выступать любой технологический параметр обработки или их сочетание (производительность, качество и др.). Сам процесс выбора комбинации напрямую зависит от оптимизационного параметра.

Сочетание механического воздействия с магнитным полем явилось основой для разработки *магнитно-абразивной обработки* (рис. 2.5). Она осуществляет полирование, удаление заусенцев, местных дефектов, окалины, скругление кромок. В процессе обработки деталь совершает вращательное

движение и на неё воздействует абразивный порошок, удерживаемый магнитами в зазоре между инструментом и деталью. В качестве рабочей среды используют порошки из абразивных и ферромагнитных материалов с различной зернистостью, величина которой зависит от требуемой шероховатости поверхности детали. Для снижения температуры поверхности детали обработку производят в жидкой среде, в частности в смеси олеиновой кислоты, продуктов переработки нефти, триэтаноламина, солей натрия. При полировании сталей порошками с зернистостью 100-300 мкм съём металла достигает 1,5-2 мг/(см^2 · мин.) при шероховатости поверхности Ra = 0,04 - 0,08 мкм. В настоящее время создано оборудование, позволяющее обрабатывать детали размером до 700 мм. Мощность таких станков не превышает 5 кВт.

При совместном использовании анодного растворения металла с воздействием абразива удаление припуска происходит под действием механического шлифования и одновременного растворения материала электрическим током. Благодаря перемещению абразива относительно поверхности заготовки происходит интенсивное удаление продуктов анодного растворения из зоны обработки, что стабилизирует процесс и повышает его технологические показатели. Такой метод называют *анодно-абразивной обработкой*. Используется в двух вариациях: с применением абразивно-несущего токопроводящего инструмента (рис. 2.6) и электронейтральным инструментом. Абразивный инструмент *1* в обоих случаях выполняется в форме кругов, брусков, применяемых при механическом шлифовании или повторяющих форму обрабатываемых поверхностей. Применяют как абразивные, так и алмазные зёрна *2*. При этом в первом случае используется инструмент на механической связке. Это позволяет подключать инструмент и деталь к разным полюсам источника питания. В процессе обработки инструмент вращают и подают на врезание со скоростью $V_н$. Электролит в зону обработки подаётся поливом либо с прокачкой через инструмент.

В зависимости от усилия прижима инструмента к заготовке абразивные зёрна удаляются как срезаемый материал заготовки, так и продукты анодного растворения.

Известна схема комбинации электрохимической и ультразвуковой обработок. На рисунке 2.7 представлена схема осуществления этого процесса. Съём металла с заготовки *4* протекает в среде электролита с абразивными зёрнами. Абразивные гранулы подаются в потоке рабочей суспензии из сопла *3 со скоростью* $V_э$ в зазор величиной, который регулируется размером зёрен. Электрод-инструмент (ЭИ) *2*, наряду с поступательным движением $V_и$ к заготовке, осуществляет ультразвуковые колебания, создаваемые ультразвуковым преобразователем *7*. Процесс удаления материала детали протекает как за счет анодного растворения, так и за счёт скалывания частиц заготовки. Такой способ обработки позволяет резко повысить производительность процесса и снизить износ инструмента.

Комбинированием тепловых и механических воздействий реализуется схема точения с нагревом (рис. 4.5). При подогреве заготовки перед зоной резания происходит снижение усилия резания, особенно заметное при обработке высокопрочных сплавов, повышение производительности до 8 раз и уменьшение износа в 5 раз.

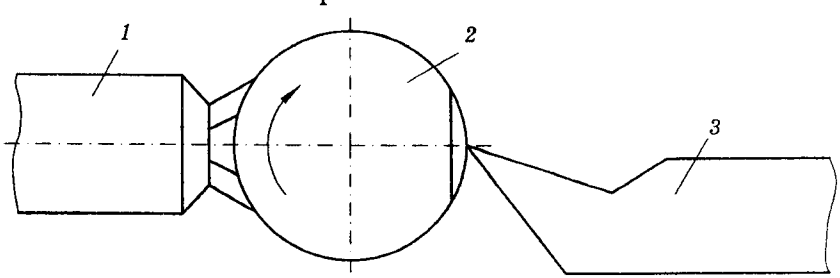


Рис. 4.5 Схема точения с нагревом:
1 — источник лучевой энергии; 2 — обрабатываемая деталь; 3 — режущий инструмент

Такой метод комбинированной обработки предполагает применение плазмотронов с плотностью теплового потока до

10^6 Вт/см^2 и расходом газа до 1 л/с или лазеров мощностью до 5 кВт. Большая плотность энергии в луче приводит к тому, что метод применим только при черновой обработке резанием.

Другой способ комбинированной обработки, сочетающей в себе электрохимическую обработку и пластическое деформирование обработанной поверхности, называют *электрохимикомеханической обработкой* (рис. 4.6). В процессе обработки поверхность, с которой в процессе анодного растворения удалён припуск, подвергается упрочнению. Это позволяет получать высокую точность профиля и стабильный расчётный наклёп поверхности.

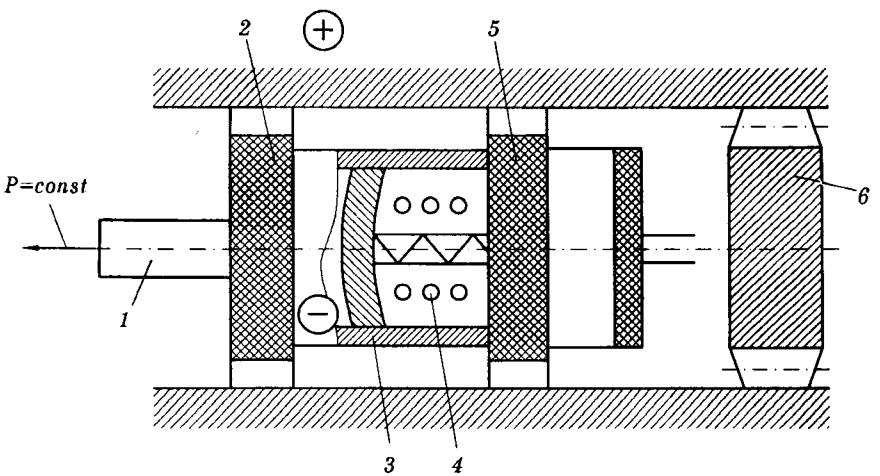


Рис. 4.6 Схема электрохимикомеханической обработки каналов:
1 — штанга для подвода тока и перемещения инструмента; 2, 5 — передняя и задняя направляющие; 3 — рабочая часть ЭИ; 4 — упругий элемент; 6 — дорн

Сочетание в одной операции электрохимического формообразования и дорнования позволяет получать каналы различного сечения с точностью до 7-го квалитета при стабильном обеспечении расчётного наклёпа. Это достигается за счёт управления скоростью перемещения дорна путём изменения

припуска под дорнование до расчётной величины с помощью электрода-инструмента. При этом ЭИ связан с дорном упругой связью. Усилие продольного перемещения инструмента поддерживается постоянным, а его величину рассчитывают исходя из натяга, необходимого для получения заданного наклепа поверхности дорном. Скорость продольного перемещения инструмента обратно пропорциональна общему припуску, а припуск под дорнование стабилизируется. Как известно, электрохимическая обработка не даёт наклёпа поверхности, поэтому припуск под дорнование имеет заданную величину независимо от размеров и свойств материала заготовки.

Обработка по такой методике позволяет назначать величину наклёпа, обеспечивающего максимальную прочность материала при циклических нагрузках. Существующий подход к операции упрочнения как к операции, при которой должен быть достигнут предельный наклёп, неверен, так как наибольшее значение усталостной прочности для большинства обрабатываемых материалов соответствует наклёпу, т.е. ниже его предельного значения. Недонаклёп или перенаклёп даже на несколько процентов значительно снижает прочность материала относительно экстремального значения. Применение же электрохимикомеханической обработки позволяет обеспечивать расчётный наклёп поверхности, соответствующий наибольшей усталостной прочности, с погрешностью не более ±1 %. Это даёт возможность повысить предел прочности при циклических нагрузках, например, для стали 40ХНМА на 10 % по сравнению с исходным состоянием, что на 6,5 % выше, чем при наклёпе до предельного состояния. Аналогичные результаты наблюдаются для титановых сплавов.

Из комбинации трёх исходных воздействий (механического, теплового и химического) был получен метод комбинированной обработки непрофилированным электродом-щёткой (рис. 4.7). Этот способ обработки даёт возможность эффективно удалять заусенцы обрабатывать кромки деталей, зачищать облой, места сварки и наплавки, полировать поверхно-

сти любой формы. Это даёт возможность успешно заменить массовые слесарные операции по зачистке литья, штамповок при ремонте деталей. Электродом-щёткой удаётся без смены инструмента обработать детали разной формы с переменным исходным припуском. При полировке достигнута шероховатость по нержавеющей стали ниже 0,63 мкм, что позволяет исключить последующую обработку деталей. Скорость удаления припуска с деталей, полученных литьём под давлением, достигает 4 м/мин. С такой скоростью может быть удалён припуск высотой до 3 мм с чугунного литья в земляные формы, что ранее требовало значительных затрат на слесарных операциях.

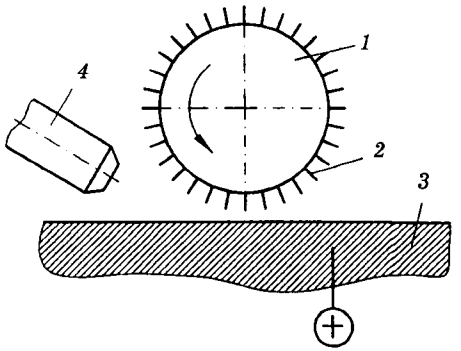
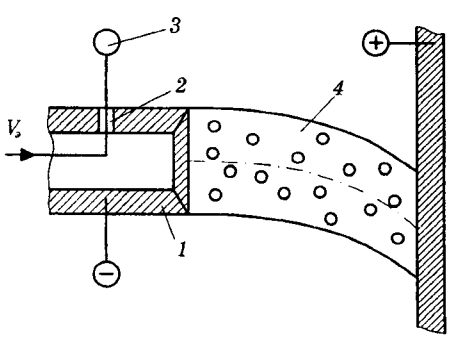


Рис. 4.7 Схема обработки электродом-щёткой:
1 — токопроводящий диск;
2 — проволока; 3 — деталь;
4 — сопло для подачи электролита



При совместном использовании анодного растворения и механической энергии свободных гранул (рис. 4.8) производится чистовая электрохимикомеханическая обработка. Такой комбинированный

Рис. 4.8 Схема обработки со свободными гранулами наполнителями:
1 — сопло; 2 — канал подвода гранул; 3 — гранула наполнителя; 4 — струя рабочей среды

метод даёт возможность обрабатывать сложнопрофильные детали, изготовленные из токопроводящих материалов, обработка которых традиционным инструментом невозможна или требует значительных затрат на проектирование и изготовление специального инструмента.

Гранулы могут быть выполнены из токопроводящих и диэлектрических материалов (металлов, графита, стекла и др.). Гранулы наполнителя помещают в струю электролита, прокачиваемого со скоростью *И*, и транспортируют ею к обрабатываемой поверхности. За счёт анодного растворения, механической дипассипации и создания наклёпанного слоя происходит значительное повышение производительности обработки. Кроме того, метод позволяет производить обработку труднодоступных полостей с осуществлением размерного удаления припуска.

Совмещение эрозионной и электрохимической обработки позволило получить метод, нашедший широкое распространение при прошивании неглубоких сквозных и глухих отверстий и полостей. Принципиальная схема этого метода представлена на рисунке 4.9.

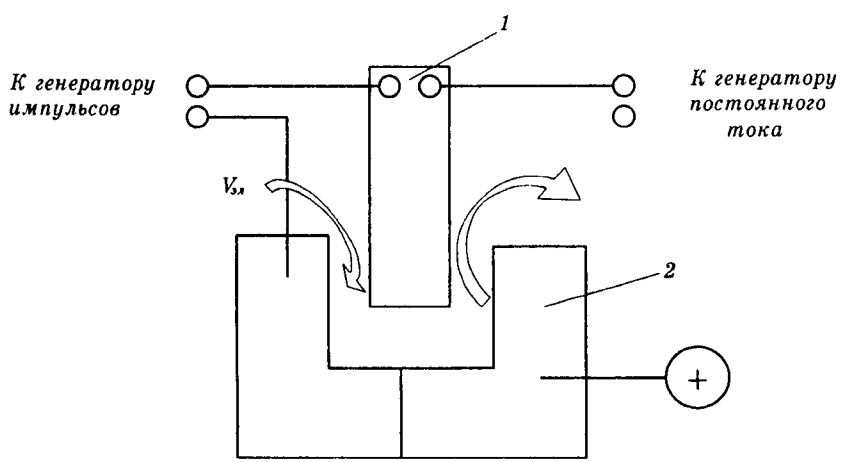


Рис. 4.9 Схема эрозионно-электрохимической обработки: 1 — электрод-инструмент; 2 — обрабатываемая деталь

В результате воздействия на металл детали двух или более процессов (эрозионного разрушения и анодного растворения) объём удалённого металла резко увеличивается. Это происходит за счёт дипассивации поверхности электрическим разрядом, быстрого удаления окисных плёнок и продуктов обработки из межэлектродного зазора, повышения коэффициента технологического использования импульса.

Перечисленные явления в несколько раз (а в начале процесса до 20 раз) увеличивают плотность постоянного тока и соответственно скорость анодного растворения. Вместе с тем наложение электрических импульсов повышает шероховатость обрабатываемой поверхности, появляется износ электрода-инструмента.

В результате углубления электрода-инструмента в детали наблюдается понижение скорости съема материала. Это объясняется появлением дополнительного сопротивления при циркуляции рабочей среды. Так, при глубине отверстия более 10 мм скорость подачи инструмента снижается до значения, характерного для электрохимической обработки. Эрозионно-электрохимической метод прошивки нашёл применение при обработке каналов, щелей и пазов на глубину до 3-4 мм.

Скорость подачи инструмента может быть увеличена до 20 раз, а погрешность границ контура снижена на 1-2 порядка при использовании луча лазера. При анодном растворении с таким нагревом зоны обработки наблюдается ионизация среды, приводящая к резкому увеличению производительности и высокой локализацией границ обработки.

4.3.3 Генеративные технологии

Вид технологий, в основе которых лежит принцип ускоренного прототипирования (Rapid Prototyping) объединяет семейство генеративных технологий на макроуровне.

Понятие «генеративные технологии» происходит от латинского «generari», что означает «вырастать», и отражает принципиальное отличие от традиционных технологий изго-

товления сначала заготовок, а затем последующей их обработки.

К генеративным относятся технологии, базирующие изготовление изделий не на отделении объёмов, составляющих припуск, а на послойном наращивании объектов до достижения требуемых их характеристик на макро-, микро- и наноуровнях и конструировании физической поверхности.

Генеративные технологии (ГТ) по своей сути являются своеобразным отражением в технике и технологии тех процессов, которые происходят в природных условиях в растительном мире. В процессе роста растение формирует только необходимые для его роста части — корни, стебель, листья, цветы, плоды. Кольца роста на срезе ствола дерева свидетельствуют, что все части растения наращиваются послойно.

С точки зрения формообразования природа даёт пример исключительно бережливых, чрезвычайно экономичных процессов. Здесь можно провести аналогию структуры приповерхностных слоёв растений и промышленных изделий, получаемых по генеративному принципу, то есть с послойным выращиванием.

Хотя идея генеративного изготовления изделий имеет давние корни, однако именно в наше время созрели все предпосылки для реализации его огромного потенциала как новой научно-производственной идеологии — *«не от большего к меньшему, а от меньшего к большему»*. Следует подчеркнуть, что генеративные технологии представляют собой образец эффективного интегрирования последних достижений материаловедения, информационных, лазерных, ионно-плазменных и других наукоёмких технологий.

Область применения этих технологий весьма широка: машиностроение, автомобилестроение, электроника, авиация, медицина и др.

Реализуема также та или иная степень использования возможностей информационных технологий для ГТ различных уровней. В особенности это касается генеративных технологий прямого формообразования, например, послойное

наращивание одно- или многократным окунанием в расплав материала, сборка из объёмных (трёхмерных) частей единой детали, спекание или сварка послойно сформированных заготовок и др.

Концепция трёх уровней позволяет системно рассматривать и реализовывать весь потенциал разнообразнейших технологий, соответствующих генеративному принципу.

На макроуровне производится послойное выращивание твёрдых тел, переход от виртуального пространства и виртуальных моделей к твердотельным объектам независимо от степени сложности их конструкции, форм и размеров. Это технологии Rapid Prototyping и им подобные.

На микроуровне производится наращивание микрослоев из различных материалов в любой последовательности толщиной от нанометров до десятков микрометров. Это технологии вакуумно-плазменные, химические, химико-термические и др.

На наноуровне осуществляется наращивание объёма, когда толщина слоёв составляет от доли нанометра до нескольких нанометров, а граничный слой за счёт текстурирования и других приёмов формирует физическую поверхность, её топографию и функциональные свойства с учётом анизотропии.

Генеративные технологии, в частности ускоренное формообразование и прототипирование по идеологии Rapid Prototyping, обеспечивают прямой переход от виртуального пространства и виртуальных моделей (электронных эталонов изделий) к реальным твердотельным трёхмерным объектам без ограничений по сложности формы, не прибегая к использованию технологической оснастки.

В соответствии с предложенной концепцией трёх уровней генеративных технологий возможна комбинация традиционных технологий (например, для изготовления макроизделия) и технологий генеративных, по крайней мере, одного из уровней — макро-, микро- или наноуровня. Широко известен вариант нанесения тонкоплёночных покрытий на режущие

инструменты изготовленные по традиционным технологиям инструментального производства.

4.4 НАНОТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Развитие технологической науки характеризуется постепенной интеграцией её традиционных отраслей в единую теорию, в основе которой лежит представление о технологии как особой форме движения вещества и энергии. По мере качественного роста знаний о фундаментальных законах строения и функционирования материи происходит дифференциация технологий как посредством реализации технологических воздействий, так и по природе используемых материально-энергетических и информационных процессов, которые лежат в их основе.

Прогресс в развитии технологии машиностроения совпадает с этапом миниатюризации изделий, решительного повышения технологических и эксплуатационных характеристик практически всех классов деталей. Достижение задаваемых параметров потребовало более тонкого и более глубокого технологического воздействия на структуру веществ. Возникла потребность в совершенствовании теоретических представлений о кинетике физико-химических процессов и поверхности и в поверхностном слое твёрдых тел, в разработке технологий молекулярного и атомного уровня, средств инструментального контроля. Возникающие высокие технологии машиностроения постепенно проникают в другие отрасли экономики, прежде всего в медицину, топливно-энергетический комплекс, в экологическую деятельность, становясь технологиями «двойного» применения.

В специальной технической литературе прочно укрепились термины «нанотехнология» и «наноматериалы». Идёт разделение этих понятий по технологическим отраслям (нано-электроника, наномеханика, нанотрибология) и видам технологий (нанофильтрация, алмазное наноточение, нанофрезерование, нанополирование). Такое же де-

ление наблюдается и в области материалов (нанофазная керамика, наноабразивы, наноструктурные адсорбенты и катализаторы, полимеры с внедрёнными наноструктурами). В общем виде «нано» (н; *n*) — греческая приставка «nanos» к наименованию единиц физических величин для образования наименьшей дольной единицы, равной 10^{-9} от исходной.

Нанотехнологию определяют как умение целенаправленно создавать объекты с заранее заданным составом, размерами и структурой в диапазоне приблизительно 1-100 нм. Это технология нового поколения качественного уровня, обеспечивающая изготовление деталей машин, сборку устройств с наперёд заданными свойствами и молекулярной структурой путём поэтапной сборки сборочных элементов с наивысшими параметрами качества. Нанотехнология объединяет различные способы размерной обработки: механические, электрофизические и электрохимические, комбинированные. Из них наиболее широко применяют механическую обработку с лезвийным и алмазным наноточением. Нанотехнология процессов механического воздействия применяется во многих областях производства для деталей разного функционального назначения:

— зеркала различного назначения;
— детали датчиков и оптической аппаратуры;
— детали двигателей летательных аппаратов;
— детали гироскопических устройств;
— детали элементов компьютерной и офисной техники;
— детали медицинской техники и медицины (хрусталики глаза, имплантанты, эндопротезы).

В нанотехнологии решают технологические задачи, характерные для обработки сверхпрецизионных деталей, связанных с управлением процесса технологического наследования. В этом случае особенность нанотехнологии состоит в том, что её маршруты могут состоять из операций различных рабочих процессов — резания, электрофизической и электрохимической обработки. Управление процесом технологи-

ческого наследования может заключаться в следующем: в изменении содержания операций, изменении набора операций или последовательности операций в технологическом маршруте. Последнее наиболее предпочтительно, так как оно ведет к наименьшим изменениям в технологической системе уже на начальных стадиях жизненного цикла.

4.4.1 Наноматериалы

Различают наноматериалы свободные и связанные.

Свободные наноматериалы в зависимости от размерности делят на ультрадисперсные (1-50 нм), высокодисперсные (50-500 нм) и грубодисперсные (500-10000 нм). Первые две категории соответствуют коллоидному состоянию вещества, тогда как третья состоит из отдельных частиц и их агломератов. К ним относят различные порошки металлов и их оксидов, углерода, оксида кремния, полимеров и др.

Связанные наноматериалы (в отличие от свободных наноматериалов) взаимодействуют с вмещающей или контактирующей средой (абразивные пасты и суспензии, бинарные оксидные каталитические системы, металлополимеры, нанокерамика и др.).

При увеличении дисперсности наночастиц происходит существенное изменение их физико-химических свойств (так называемый размерный эффект). Ультрадисперсным наноматериалам свойственны высокая твёрдость, значительное снижение вязкости, вплоть до сверхпластичности, более высокое сопротивление деформации, низкая хладоёмкость. Проводимость металлических наночастиц носит полупроводниковый характер. При уменьшении их размерности увеличивается критическая температура сверхпроводящего перехода, происходит существенный рост предела текучести, электрического и сорбционного потенциалов. Имея чрезмерно развитые межфазовые поверхности, наночастицы накапливают избыточную по сравнению с аморфными материалами энергию. Так, ультрадисперсные частицы порошкового ок-

сида алюминия на границе раздела двух фаз (например, с водой) могут образовывать электрический потенциал около 100-150 эВ. Благодаря этому качеству наноматериалы иногда называют энергонасыщенными системами.

Наноразмерные структуры формируются и функционируют на молекулярном уровне, где перестают действовать традиционные физические законы машиностроения такие как: законы теоретического металловедения; законы известных теорий размерной обработки резанием; законы сопротивления материалов, механики, используемые для расчётов узлов машин и их сборки. Здесь вступают в действие законы квантовой механики, которые приводят к совершенно неожиданным, с точки зрения классических законов, последствиям.

Методы нанотехнологий и наноматериалов позволяют не только визуалировать атомные структуры, но и манипулировать отдельными атомами и строить новые молекулы. Он основан на использовании эффекта туннелирования электронов (туннельного эффекта), связанного с использованием волновых свойств электронов. Его применение на вершинах зондов специальных конструкций позволило достичь высокой пространственной разрешающей способности управления атомно-молекулярными реакциями в отличие от известных групповых технологий осаждения материалов, методов оптической литографии, эпитаксии, а также электронной литографии, где высокая энергия фокусируемых электронов приводит к значительному разрушению используемых материалов.

Уникальными свойствами обладают обнаруженные в углеродных каркасных структурах так называемые нанотрубки. Они в 50 тыс. раз тоньше человеческого волоса и в 1000 раз прочнее стали; обеспечили новому поколению компьютеров практически неограниченную память и скорость действия. Область возможного их применения очень широка — от бытовой техники до ракетно-космической.

4.4.2 Технологии нанообработки деталей машин

Механические воздействия нанотехнологических процессов на поверхность по своему характеру делят на постоянное и импульсное.

К *постоянному* механическому воздействию относят: обработку металла резанием известными и абразивными инструментами со снятием стружки. К *импульсному* — формообразование без снятия стружки пластическим деформированием. В нанотехнологии сложился тип сферединамического формообразования детали (при изготовлении деталей медицинской техники: офтальмологические иглы, эндопротезы, имплантанты. Наноразмерная обработка находит применение при изготовлении супергладких ювелирных деталей при изготовлении зеркальных элементов, деталей гироскопов, вычислительной техники, полиграфических машин, летательных аппаратов.

В нанотехнологии для сверхточной размерной обработки деталей машин применяют обработку лезвийными абразивами и инструментами. Каждый из этих видов обработки имеет свои преимущества и недостатки.

Алмазное наноточение. Наноразмерная обработка алмазным наноточением применима ко многим материалам, металлам и неметаллам, но особенно очевидны его преимущества для хрупких материалов и прецизионных систем. Алмазным наноточением изготавливают следующие изделия: детали гироскопов, прецизионные подшипники, детали инфракрасной оптики оптикосложной геометрии, асферические зеркала лазерных систем, высоточные детали головок видеоаппаратуры, объектов микроскопов, детали приборов ночного видения, основы дисков памяти ЭВМ, многогранные зеркала лазерных принтеров.

Алмазное наноточение обладает преимуществами перед абразивной обработкой:

— отсутствием шаржирования поверхности обрабатываемой детали абразивными частицами;

— отсутствием растягивающих поверхностных напряжений;
— высокой производительностью (производительность выше в 5-10 раз повысить в сравнении с обработкой свободным абразивом);
— нейтральностью инструмента;
— не требует больших мощностей резания.

Трением шпинделя в аэростатических опорах можно пренебречь.

Особенности процесса алмазного точения:

— процесс резания алмазным резцом зависит от соотношения толщины срезаемого слоя и радиуса закругления режущей кромки резца. При уменьшении толщины среза процесс резания становится менее устойчивым, затрудняется поступление новых слоёв металла в зону стружкообразования, так как значительно увеличивается отрицательная величина действительного переднего угла и становится невозможным скалывание слоёв металла;
— при точении габаритных деталей, требующих длительной обработки, повышение температуры поверхности алмаза с достаточно малым радиусом кривизны может привести к преимущественному окислению режущей кромки кислородом воздуха (обгорание резца). При этом изменяются радиус кривизны режущей кромки и длина резца, что уменьшает точность обработки. При значительном обгорании необходимы либо эффективный теплоотвод с режущей кромки, либо установка специального колпака, позволяющего проводить точение в атмосфере инертного газа (аргона).
— при обработке шероховатых поверхностей с малыми заглублениями (сравнимыми с амплитудой шероховатости) происходит модуляция толщины стружки, что приводит к флуктуациям горизонтальной составляющей силы резания (из-за изменения лобового сопротивления на резец действует возмущающая высокоча-

стотная сила), что может существенно повлиять на профиль образующейся после точения поверхности.

Возможный механизм образования шероховатости следующий: из-под резца вытекает материал, подверженный действию повышенного давления и температуры, находящийся в поле действия высокоточных колебаний и центробежной силы.

Вытекающий из-под резца и выдавившийся в бок материал растекается по более холодной поверхности; из-за пространственной модуляции разгрузки резца возможны образование волны, разряжения на границе раздела фаз жидкость–твёрдое тело. Так как охлаждение материала происходит постоянно, то величина жидкого слоя уменьшается, и возможно увеличение амплитуды колебаний остывающего металла за счёт эффекта приливных волн.

Другим эффектом, связанным с возникновением колебаний резца из-за неравномерности среза, являются автоколебания в системе резец-деталь. Вероятность возникновения автоколебаний в системе резец-деталь повышается вследствие того, что обычно точение проводится с постоянной угловой скоростью (об/мин.), обусловливающей изменение линейной скорости точек детали, что способствует выполнению в каком-то положении резца условий возникновения автоколебаний;

— режущая кромка алмазного резца в процессе обработки находится в напряжённом состоянии, подвержена влиянию повышенных температур. Поэтому возможно раскрытие поверхностных микротрещин, что в конечном итоге вызывает появление выколов на режущей грани. Это приводит к потере формы резца и отрицательно сказывается на качестве обрабатываемой поверхности.

Эти выводы необходимо учесть при дальнейшей разработке теоретической модели алмазного точения.

Оборудование для алмазного наноточения

Комплект оборудования строится по агрегатно-модульному принципу с уровнем унификации узлов и деталей до 80 %.

Оборудование, входящее в комплект, может изготовляться как с ЧПУ, так и с ручным управлением. Базовым станком в указанном комплекте оборудования является сверхточный станок МК6521Ф3.04 с ЧПУ для обработки наружных и внутренних поверхностей тел вращения, а также сферических и асферических поверхностей (рис. 4.10).

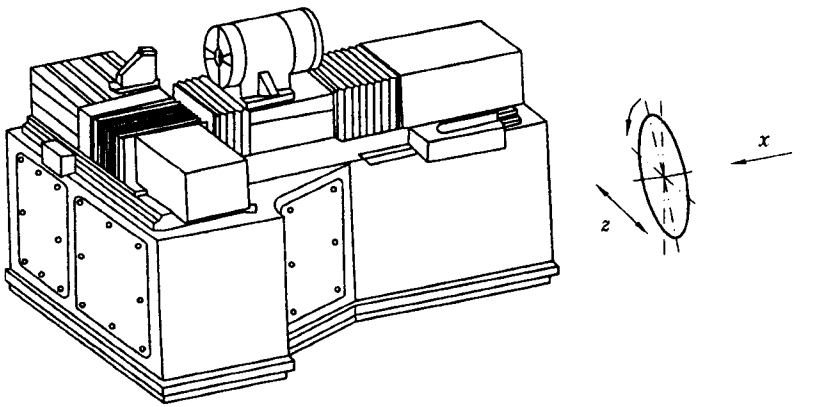


Рис. 4.10 Токарный станок модели МК6521Ф3.04

Технические характеристики станка:

Наибольший диаметр заготовки, мм 300
Наибольшая длина заготовки, мм 200
Дискретность обработки перемещений
по осям x и z, нм 10
Шероховатость обрабатываемой поверхности Rz,
не менее, нм 25
Погрешность формы обработанной
поверхности, мкм 0,5

Станок скомпонован следующим образом. На станине Т-образной формы установлены два суппорта. Один перемещается по оси x (инструментальный суппорт), другой — по оси z (суппорт шпиндельного узла). Т-образное расположение суппортов позволяет уменьшить высоту расположения оси шпинделя над станиной, более равномерно распределить

нагрузки на суппорты, перемещающиеся по осям x и z, увеличить жёсткость несущей системы станка, Т-образная станина установлена на пневматических опорах.

В исполнительных органах станка использованы аэростатические опоры, бесконтактные магнитные передачи винт-гайка, а также демпферы, основанные на сверхвязких жидкостях.

Для отсчёта координат используют двухкоординатный лазерный датчик линейных перемещений, для управления станком — многопроцессорную специализированную систему ЧПУ с устройством подготовки управляющих программ. Главный привод станка выполнен по схеме электромашинного преобразователя. Такая схема обеспечивает минимум вибраций и нагрева исполнительного двигателя, и следовательно, положительно влияет на точностные характеристики станка. Привод шпинделя осуществляется многополюсным электродвигателем, частота электромагнитных вибраций которого составляет сотни герц, а собственные частоты узлов станка, как правило, на порядок меньше. В связи с этим воздействие электромагнитных вибраций на станок ничтожно мало.

Конструктивно электрическая часть главного привода выполнена из двух основных блоков: статического преобразователя частоты, электромашинного преобразователя и исполнительного двигателя шпинделя.

Связь главного привода с системой ЧПУ обеспечивается с помощью сигналов задания частоты вращения, сигнала обратной связи по скорости с помощью фотоимпульсного датчика, а также с помощью логических сигналов электроавтоматики.

Привод подач, как и главный привод станка, является маловиброактивным. Двигатель подач напрямую не связан с зоной обработки, а присоединён к винту бесконтактной передачи винт-гайка. При этом основной поток вибраций действует в направлении, перпендикулярном направлению движения суппортов, и задемпфирован горизонтальным и вертикальным демпферами.

Электропривод подач является полностью бесконтактным и конструктивно выполнен в виде блоков синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, преобразователя напряжения, синхронного тахогенератора и датчика положения ротора.

Сигнал о начале работы привода подач подаётся системой ЧПУ. Обратная связь по положению осуществляется с помощью датчиков обратной связи (поворот датчика или лазерного интерферометра).

Наноабразивное шлифование и полирование

Наноабразивное шлифование и полирование являются одними из стадий типового технологического маршрута суперфинишной обработки при изготовлении металлических лазерных зеркал на основе молибдена, меди, алюминия и его сплавов. Обработке подвергают не только цветные, но и чёрные металлы и сплавы, а также неметаллические материалы. Используют свободные или связанные абразивы (микропорошки карбида титана и хрома, кубического нитрида бора, порошки оксида алюминия с частицами сферической формы). Среди методов наноабразивного полирования выделяют гидроэкструзивное хонингование, скользящее шлифование, безабразивное полирование деталей.

Один из недостатков абразивной обработки — сильное влияние применяемых в настоящее время абразивных составов на физико-химические свойства обрабатываемой металлической поверхности, связанное с процессами окисления. Это объясняется тем, что при этом виде обработки появляются свободные электроны, приводящие к окислению поверхностного слоя. Толщина образующейся при этом оксидной плёнки значительно больше, чем высота неровностей на реальной металлической поверхности.

Безабразивное полирование деталей из конструкционных сталей и сплавов устраняет недостатки абразивных методов полирования. В настоящее время известно несколько способов безабразивного полирования поверхностей деталей из

конструкционных сталей, основанных на использовании энергии ультрозвуковых колебаний.

Сущность безабразивного полирования на основе использования энергии ультрозвуковых колебаний состоит в приведении поверхностного слоя в пластическое состояние с последующим разглаживанием микронеровностей поверхности инструментом, совершающим ультразвуковые колебания.

Колебательная система установлена в специальном приспособлении, закреплённом на верхней части суппорта станка, и совершает таким образом движение продольной подачи. Специальное приспособление позволяет устанавливать продольную ось колебательной системы под различными углами.

4.4.3 Теоретические основы процесса наномеханической обработки

До недавнего времени теории наномеханической обработки деталей не было. Ранее была создана теория нанотехнологии в криогенной технике и наноэлектронике. Она базируется на квантовых размерных эффектах и не может быть использована в механической обработке деталей машин, так как не объясняет явления, связанные с изменением природы материала под механическим воздействием. Существующие теории обработки материалов давлением и резанием также не могут объяснить явлений, обусловливающих перестройку исходной кристаллографической решётки материала, в процессе холодной пластической деформации при создании материалов с заданными свойствами.

Теоретическими основами нанотехнологии механической обработки деталей являются:

— теория первичного формообразования с возможностью перестройки кристаллографической решётки на атомарном уровне для управления свойствами материалов в процессе их вторичного формообразования;

— теория оценки параметров поверхностного слоя с помощью величины работы выхода электрона;

— механизмы волнового характера протекания развитой пластической деформации.

При этом исследованы новые, генетически заложенные в электронно-структурном состоянии материала, механизмы волнового характера протекания развитой пластической деформации, что позволило открыть новое физическое явление локального ферромагнетизма в парамагнитных материалах. Этот механизм состоит в создании (в процессе холодного пластического деформирования) автономного, спонтанного, экологически чистого источника реактивной энергии формообразования, аккумулирующего нежелательные потери подводимой активной энергии пластической деформации. Разработанный источник реактивной энергии деформации поглощает потери подводимой энергии деформирования. Затем переводит всю систему деформирования в состояние динамической неустойчивости, обеспечивая встречно направленное деформирование материала обрабатываемой заготовки со стороны активного и реактивного источников энергии и реализацию низкоэнергетических механизмов ротационной пластичности, обусловливающих появление дополнительных каналов диссипации энергии и степеней свободы.

Возникшее энергетическое состояние в кристаллографической структуре обрабатываемого материала способствует появлению локальных метастабильных кристаллографических ориентировок, создающих новые, уникальные сочетания физико-механических свойств в материале, которые являются развитием заложенного в поликристалле генетического кода как структурного потенциала возможных кристаллографических его превращений и перспектив создания качественно новых структур для данного материала.

Теория нанотехнологии первичного формообразования для управления свойствами материалов основывается на вышеописанной кинетике деформационных кристаллографических преобразований, которая, в свою очередь, определена эффектом сферодинамического деформирования. Теория базируется на решении основной проблемы механики твёрдого тела:

установлении связи между внешним воздействием на среду, изменением исходной структуры среды и возникающим вследствие этого воздействия полем локальных возбуждений среды (механическим полем).

В процессе исследования этой общей проблемы были разработаны различные модели, описывающие отдельные аспекты поведения деформируемого тела (упругость, упругопластичность, вязкоупругость). Наиболее интересной является модель реальной среды с исходными металлургическими дефектами, которая, как кристаллографическая система, описывается тензором дисторсии (distortion-искривление): шесть компонентов упругой деформации и компонента вектора поворота обусловливает реализацию вращательных степеней свободы поликристалла материала при появлении несовершенств в процессе пластического формообразования, причём разрывность вектора поворота вызывает появление коллективных ротационных моделей деформации.

При наномеханической обработке важной проблемой является проблема изучения процессов *наноконтактирования*. Механическое, механохимическое, гальваническое взаимодействия твёрдых тел в процессе их контактирования происходят первоначально в небольшом числе точек, воспринимающих всю нагрузку. При этом в областях с субмикронными характерными размерами развиваются напряжения, близкие к теоретическому пределу прочности (порядка нескольких процентов от модуля Юнга), и относительные деформации ε в десятки процентов. Причём подобные напряжения возникают даже в таких хрупких и не деформируемых пластически в обычных условиях материалах, как карбиды или бориды тугоплавких металлов.

По мере удаления от точки контакта напряжения и деформации быстро падают и не представляют уже никакой опасности для материала. Благодаря крайней малости локально деформированной области скорость относительной деформации, достигает значений 10^6 м/с, характерных для деформации детонирующих взрывчатых веществ. Таковы

условия при сухом трении одного тела по поверхности другого. Они могут возникать при наноразмерной обработке деталей машин. Атомарные процессы, происходящие при этом в тонких приповерхностных слоях, определяют служебные свойства изделия, его долговечность, износостойкость, коэффициент трения, химическую и каталитическую активность поверхности.

В свете изложенного, особое значение для наноразмерной обработки приобретают методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Они позволяют приблизиться к условиям, возникающим в реальных микро- и наноконтактах, и смоделировать при хорошо контролируемых условиях элементарные процессы в областях, сильно деформированных высокой локальной нагрузкой.

Методы сканирующей зондовой микроскопии позволяют не только визуализировать микротопографию поверхности, но и исследовать более десятка механических характеристик материала в приповерхностных слоях, покрытиях, плёнках толщиной от единиц нанометров до нескольких микрометров, т.е. перейти от двумерного к трёхмерному анализу приповерхностных слоёв материала.

В настоящее время разработаны целые комплексы предназначенные для широкого класса нанотехнологических задач. На рисунке 4.11 изображён сверхвысоковакуумный нанотехнологический комплекс Nanofab 100.

Сверхвысоковакуумный нанотехнологический комплекс Nanofab 100 разработан для нанотехнологических разработок на пластинах диаметром до 100 мм. Отличительной особенностью используемой системы сканирующей зондовой микроскопии (СМЗ) измерительного узла комплекса является её универсальность. Держатель зонда СЗМ является сменным и позволяет устанавливать на один и тот же сканер держатели с атомно-силовыми и сканирующе-тунельными зондами. Аналитико-технологические возможности Nanofab 100 позволяют проводить широкий круг как технологических операций по созданию наноэлектронных эле-

ментов, так и исследований разнообразных свойств наноструктур.

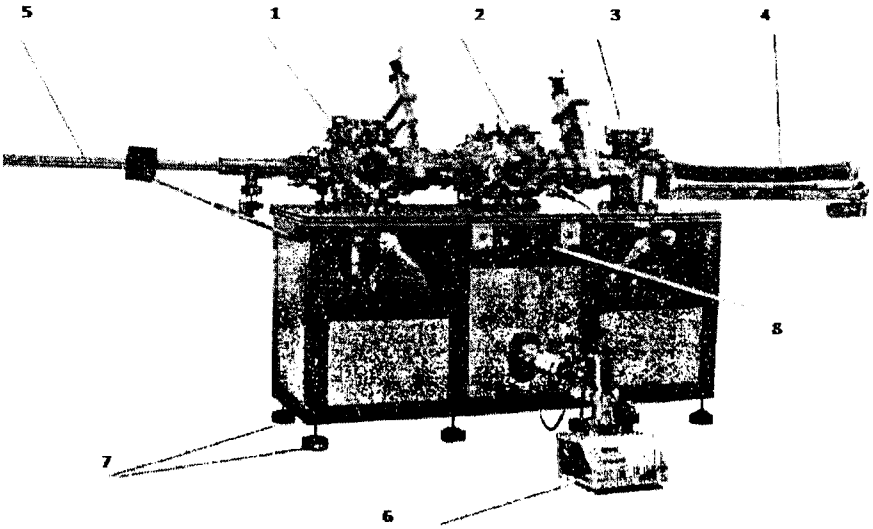


Рис. 4.11 Сверхвысоковакуумный нанотехнологический комплекс Nanofab 100:
1 — загрузочная камера; 2 — аналитическая камера сканирующее-зондового микроскопа (СЗМ); 3 — камера смены зондов; 4 — манипулятор образца; 5 — манипулятор смены зондов; 6 — форстанция; 7 — пассивная виброизоляция; 8 — активная виброизоляция

Нанотехнологии реально становятся ведущими в XXI-ом веке технологиями. Способствуя развитию экономики и социальной сферы общества, они могут стать предпосылкой новой промышленной революции. Стремительное развитие нанотехнологий позволило достичь уникальных научных результатов в различных областях физики, химии, биологии, технологии. Постоянно совершенствуются и создаются новые конструкции приборов и агрегатов для возрастающих потребностей нанотехнологий. Скорее всего, когда наш читатель будет перелистывать эти страницы, отечественные специалисты введут в эксплуатацию новую, уникальную модель суперсверхвысоковакуумный нанотехнологический роботизи-

рованный комплекс Nanofab 200. На очереди следующая модель нанотехнологического роботизированного комплекса Nanofab 300, в проекте которого заложены ещё более широкие аналитико-технологические возможности.

Контрольные вопросы

1. Что такое синергетика, какова её роль в изучении проблем технологии машиностроения?
2. Приведите примеры самоорганизации в технических системах машиностроения.
3. Что вкладывается в понятие «наукоёмкие технологии в машиностроении»?
4. В чём состоит отличительная особенность комбинированных технологий?
5. Сущность генеративных технологий.
6. Что такое «быстрое прототипирование»? Его назначение и перспективы использования в машиностроении.
7. Какова роль нанотехнологий в машиностроительном производстве?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева, А.В. Основы физикохимии и технологии композитов [Текст] : учеб. пособие для вузов / А.В. Андреева. — М.: ИПРЖР, 2001. — 192 с.

2. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения [Текст] : учебник для вузов / Б.М. Базров. — М.: Машиностроение, 2005. — 736 с.

3. Бахарев, В.П. Основы проектирования и конструирования в машиностроении [Текст] : учебное пособие. Ч. 1. Общие методы проектирования и расчёта. Надёжность техники / В.П. Бахарев, М.Ю. Куликов, И.И. Бортников, А.Г. Схиртладзе. — Иваново: Иван. гос. ун-т, 2007. — 234 с.

4. Буданов, В.Г. Трансдисциплинарное образование, технологии и принципы синергетики [Текст] / В.Г. Буданов. — М.: Прогресс-Традиция, 2000. — С. 285-304.

5. Вороновский, Г.К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности [Текст] / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев. — Харьков: Основа, 1997. — 112 с.

6. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безызносность) [Текст] : учебник. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: «Издательство МСХА», 2002. — 616 с.

7. Горбань, А.Н. Методы нейроинформатики. [Электронная публикация]: — http;//www.iph.ras.ru/-mifs.

8. Гжиров, Р.А. Краткий справочник конструктора [Текст]: справочник / Р.А. Гжиров. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. — 464 с.

9. Долингер, В.А. Математическое моделирование как средство интегрирования естественнонаучных дисциплин [Текст] / В.А. Долингер // Интегрирование образования, 2004.

10. Зиновкина, М.М. Креативное инженерное образование [Текст] : Монография / М.М. Зиновкина. — М., 2003. — 372 с.

11. Иванов, М.Н. Детали машин [Текст] : учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений / М.Н. Иванов. — М.: Высш. шк., 1991. — 383 с.

12. Куринский, В.А. Автодидактика [Текст] / В.А. Куринский. — М.: Автодидакт, 1994. — 307 с.

13. Ксевич, Ю.А. Нетрадиционные методы обработки материалов [Текст] : учебное пособие для высших учебных заведений / под ред. А.Д. Гладуна. — М.: Изд.-во «Станкин»,1997. — 163 с.

14. Михалкин, В.С. Концепция целостности естественнонаучного цикла дисциплин технического вуза [Текст] / В.С. Михалкин. // Интегрирование образования. — 2003. — № 1. — С. 77.

15. Никифоров, А.Д. Современные проблемы науки в области технологии машиностроения [Текст] : учеб. пособие для вузов / А.Д. Никифоров. — М.: Высш. Шк., 2006. — 392 с.: ил.

16. Орлов, П.И. Основы конструирования [Текст]: справочно-методическое пособие : В 2 кн. / под ред. П.Н. Учаева. — М.: Машиностроение, 1988.

17. Попов, Д.Н. Гидромеханика [Текст]: учебник для вузов / Д.Н. Попов, С.С. Панаиоти, М.В. Рябинин / под редакцией Д.Н. Попова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 384 с.

18. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры [Текст] / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. — 2-е изд., испр. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 320 с.

19. Сердобинцев, Ю.П. Триботехническое моделирование и исследование модифицированных пар трения технологического оборудования [Текст] : монография / Ю.П. Сердобинцев, А.А. Подщипков. — Волгоград: Волгоград. гос. техн. ун-т, 2002. — 180 с.

20. Схиртладзе, А.Г. Гидравлические и пневматические системы [Текст] / А.Г. Схиртладзе, В.И. Иванов, В.Н. Кареев. — 2-е изд., доп.— М.: ИЦ МГТУ «Станкин», «Янус-К», — 2003. — 544 с.

21. Схиртладзе, А.Г. Гидравлика: учебник для студентов высших учебных заведений машиностроительных направлений и специальностей [Текст] / А.Г. Схиртладзе, А.И. Пульбере, Л.А. Чупина, В.И. Иванов / под ред. Л.А. Чупиной. — Тирасполь: РИО ПГУ, 2004. — 228 с.

22. Схиртладзе, А.Г. Гидравлика [Текст] / А.Г. Схиртладзе, А.И. Пульбере, Л.А. Чупина [и др.].; под ред. Л.А. Чупиной. — Тирасполь: РИО ПГУ,2004. — 228 с.

23. Схиртладзе, А.Г. Технологическое оборудование машиностроительных производств [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.Г. Схиртладзе, В.Ю. Новиков. — М.: Высш. Шк., 2006.

24. Схиртладзе, А.Г. Проектирование нестандартного оборудования [Текст] : учеб. для вузов / А.Г. Схиртладзе, С.Г. Ярушин. — М.: ООО «Новое знание», 2006.

25. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника [Текст] : Теория и практика / Ф. Уоссермен. — М.: Мир, 1992.

26. Шейпак, А.А. Гидравлика и гидропневмопривод [Текст]: учебное пособие / А.А. Шейпак. — М.: МГИУ, 2003. — 193 с.

27. Яманин, Ф.И. Компьютерно-информационные технологии в двигателестроении [Текст] / Ф.И. Яманин, Ю.В. Голубев, А.В. Жаров [и др.].; под ред. Ф.И. Яманина. — М.: Машиностроение, 2005. — 480 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ 5
ОБОЗНАЧЕНИЯ 5

ВВЕДЕНИЕ 8

ГЛАВА 1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ. 11
1.1 Системность — основа инженерного мышления 11
1.2 Определения и понятия системного подхода 18
1.3 Виды моделирования технических систем 25
Контрольные вопросы 29

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 31
2.1 Уравнения движения жидкой среды в напряжениях 31
2.2 Математическая модель вязкой сжимаемой жидкости 35
2.3 Замкнутые математические модели для вязкой несжимаемой жидкости 40
2.3.1 Математические модели движения вязкой несжимаемой жидкости в круглых трубах 43
2.3.2 Математические модели движения вязкой несжимаемой жидкости в тонких слоях 46
2.4 Реализация расчётов гидромеханических моделей на ЭВМ 52
2.4.1 Общая схема применения численных методов 52
2.4.2 Пример расчёта гидромеханических моделей в среде ANSYS 56
2.5 Применение метода искусственных нейронных сетей (МИНС) для решения задач моделирования технических систем 65
2.5.1 Базовые основы нейронных сетей 67
2.5.2 Многослойный персептрон — один из видов архитектуры нейросети 72
2.5.3 Оптимизация структуры сетей 81
Контрольные вопросы 84

ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ **86**
3.1 Гидродинамические процессы при абразивной обработке 86
3.1.1 Моделирование производительности (величины съёма) при виброабразивной обработке 86
3.1.2 Упругий гидромеханический контакт в зоне шлифования 94
3.2 Особенности проектирования газодинамических опор 98
3.2.1 Методы расчёта газовых подвесов 100
3.2.2 Методы расчёта газодинамических и гибридных подшипников 104
3.3 Проектирование жидкостных опор скольжения 109
3.3.1 Общая характеристика подшипников скольжения. Условия существования режимов смазки подшипников 110
3.3.2 Характеристика режима работы. Коэффициент надёжности подшипника 119
3.3.3 Влияние геометрических размеров и шероховатости поверхностей на несущую способность подшипника 125
3.4 Алгоритм расчёта подшипников жидкостной смазки ... 129
Контрольные вопросы 137

ГЛАВА 4. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОБЛЕМАМ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ **138**
4.1 Синергетика и технология машиностроения 138
4.2 Самоорганизация в технических системах 146
4.2.1 Общие сведения о самоорганизации в узлах трения 146
4.2.2 Явление безызносности при трении 151
4.2.3 Формирование свойств композиционных материалов 154
4.3 Современные наукоёмкие технологии в машиностроении 160

4.3.1 Основные сведения о наукоёмких технологиях в машиностроении 160
4.3.2 Комбинированные методы обработки 163
4.3.3 Генеративные технологии 170
4.4 Нанотехнологии в машиностроении 173
4.4.1 Наноматериалы 175
4.4.2 Технологии нанообработки деталей машин 177
4.4.3 Теоретические основы процесса наномеханической обработки 183
Контрольные вопросы 188

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 189

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

БАХАРЕВ Вениамин Павлович
ДУБИНИН Александр Павлович
СХИРТЛАДЗЕ Александр Георгиевич

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Учебное пособие
В двух частях
Часть 2
Моделирование и прогнозирование развития технических систем машиностроения
Под редакцией профессора А.Г. Схиртладзе

Редактор *Попова Л.В.*
Технический редактор *Макаров А.В.*
Компьютерная верстка *Ефремовой М.В.*
Компьютерная графика *Борискиной А.В.*

Подписано в печать 24.12.08.
Формат 60 х 84/16. Бумага писчая.
Гарнитура SchoolBookCTT. Усл. печ. л. 11,39.
Тираж 600 экз. Заказ N 334.

Издательство «Тонкие наукоёмкие технологии»
309530, г. Старый Оскол, Белгородской обл.,
м-н Макаренко, д. 40,
тел./факс (4725) 42-35-29, 42-35-39
E-mail: st_tnt-press@belgtts.ru; st_tnt-press@mail.ru
Адрес в Интернете: www.tntpress.ru

Отпечатано в типографии ООО «Тонкие наукоёмкие технологии»
309530, г. Старый Оскол, Белгородской обл.,
м-н Макаренко, д. 40,
тел./факс (4725) 42-35-29, 42-35-39

ISBN 978-5-94178-197-3

Мы рады Вам помочь!

Издательство
ООО «Тонкие Наукоёмкие Технологии»

Издаёт:

- учебники, методические пособия для высших и средних образовательных учреждений, художественную литературу

- все виды бухгалтерских бланков и служебной документации;

- конверты, календари, открытки, афиши и многое другое.

309530, г. Старый Оскол, Белгородская область,
м-н Макаренко, д. 40, т. (4725) 42-35-39
т/ф. (4725) 42-35-29

E-mail: st_tnt-press@belgtts.ru; st_tnt-press@mail.ru
Адрес в Интернете: www.tntpress.ru

Быстро и качественно!

Все, что печатают в России.