

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

И.И.БЕРКОВИЧ, Д.Г.ГРОМАКОВСКИЙ

ТРИБОЛОГИЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕХАНИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Учебник для вузов

Под редакцией д-ра техн. наук, профессора
Д.Г. Громаковского

Самара 2000

ББК 34.41 2 075
УДК 620.179.112

Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов/*И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский*; Под ред. Д.Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. 268 с.

Изложены современные научные представления трибологии о физической природе явлений, протекающих на фрикционном контакте, механика и термодинамика процессов трения, изнашивания и смазки. Рассмотрены молекулярно-кинетические аспекты и термоактивационный механизм формирования и разрушения поверхностных слоев, основы фрикционного материаловедения, применяемые физические методы исследования свойств поверхностных слоев, технологические способы повышения износостойкости и эксплуатационных свойств деталей узлов трения.

В основе учебника лежат курсы лекций по трибологии, которые авторы читали студентам в Самарском и Тверском государственных технических университетах.

Предназначен для студентов специальностей 12.06.00 «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов», 12.01.55 «Ремонт и восстановление автомобилей» и 23.01.00 «Сервис и техническое обслуживание транспортных и технологических машин и оборудования», а также может быть полезен для студентов специальности 07.12.00 «Инженер - триботехник», инженеров, аспирантов и научно-технических работников, связанных с расчетом, конструированием, испытаниями и эксплуатацией транспортных машин.

Рекомендован Министерством образования РФ в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, изучающих трибологию и машиностроительные дисциплины по автомобилестроению, двигателестроению и эксплуатации транспортных машин. JSBN 5-7964-0164-5.

Табл. 41. Ил. 145. Библиогр.: 92 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского Совета Самарского Государственного технического университета

Рецензент: д-р техн. наук *Ф.Р.Геккер*

JSBN 5-7964-0164-5

© И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский, 2000
© Самарский Государственный технический университет, 2000

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О КОНТАКТИРОВАНИИ И ТРЕНИИ СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	10
1.1. Анализ контактирования и оценка площади соприкосновения	11
1.2. Трение скольжения	23
1.3. Влияние скорости скольжения и температуры на свойства контакта и фрикционные колебания.....	29
1.4. Трение качения.....	31
1.5. Гидродинамическое трение.....	32
Заключение	35
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	36
Глава 2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ	37
2.1. Общая характеристика динамических явлений в узлах трения	37
2.2. Узел трения как объект моделирования в динамике машин	38
2.3. Динамическая характеристика узлов трения	40
2.3.1. Инерционные свойства узлов трения	40
2.3.2. Характеристика возбуждающих сил в узлах трения.....	40
2.3.3. Упругие свойства узлов трения.....	40
2.3.4. Диссипативные свойства узлов трения	42
2.3.5. Механизм рассеяния энергии при тангенциальных колебаниях	45
2.4. Общая схема оценки величины динамического нагружения в узлах трения	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	48
Глава 3. СТРОЕНИЕ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРУЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ.....	49
3.1. Строение, структура и дефекты материалов пар трения.....	49
3.2. Физические свойства поверхностных слоев.....	55
3.3. Влияние механической обработки на служебные свойства поверхностного слоя. Характеристики шероховатости поверхностей	58
3.4. Краткая характеристика некоторых вопросов теории строения, природы свойств и состояния материала поверхностных слоев	60
3.5. Обзор известных способов оценки активационных параметров разрушения материалов	64
3.6. Разработка и теоретическое обоснование нового способа оценки активационных параметров материалов при склерометрировании	67
3.7. Применение склерометрии для оценки энергии активации термомеханической деструкции смазочных материалов	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	86

Глава 4. ИЗНАШИВАНИЕ	88
4.1. Основные характеристики и виды изнашивания	88
Усталостное изнашивание	89
Абразивное изнашивание	89
Коррозионно-механическое изнашивание	90
Водородное изнашивание	91
4.2. Кинетическая интерпретация изнашивания	92
4.3. Термодинамическая интерпретация изнашивания	95
4.4. Физические методы изучения состояния поверхностных слоев	98
Фрактография износа	101
4.5. Применение рентгеновских методов исследования в трибологии	105
4.5.1. Пример исследования изнашивания шарниров шасси самолетов	107
4.5.2. Пример исследования изнашивания чугунных поверхностей	108
4.5.3. Пример комплексного исследования изнашивания при фреттинг-коррозии титановых сплавов	111
4.6. Общие сведения о проблеме моделирования изнашивания	116
4.6.2. Феноменологический подход	118
4.6.3. Концептуальный подход	121
4.6.4. Металлофизический подход	125
4.6.5. Термодинамический подход	125
4.6.6. Кинетический подход	127
4.6.7. Синергетический подход	128
4.6.8. Системе понятий использованных при разработке новой кинетической модели изнашивания	129
4.6.9. Процесс разработки и характеристика кинетической модели изнашивания	132
Заключение	137
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	138
Глава 5. ТРИБОТЕХНИКА	140
5.1. Характерные узлы трения транспортных машин	140
5.1.1. Основные узлы трения и изнашивание в двигателях внутреннего сгорания	140
5.1.2. Агрегаты шасси, трансмиссии и рулевого управления	147
5.1.3. Шины и проблемы движения колесных машин	152
5.2. Конструкционные материалы узлов трения	156
5.2.1. Металлические антифрикционные материалы	157
5.2.2. Антифрикционные материалы, получаемые из порошков и пластмасс	159
5.2.3. Фрикционные материалы	161
5.2.4. Полимерные материалы	164
Материалы на основе полиимидов	169
Материалы на основе поликарбоната	171
Материалы на основе полиэтилена	172
Материалы на основе полиарилатов	173
Материалы на основе эпоксидных смол	173
Материалы на основе фенолформальдегидных полимеров (ФФП)	175
5.3. Смазывание и смазочные материалы	175
5.3.1. Назначение смазочных материалов	175
5.3.2. Смазочные масла, их физико-механические свойства и методики оценки характеристик	176
5.3.3. Состав масел и механизм смазочного действия. Роль функциональных присадок к смазочным маслам	179

5.3.4. Опыт разработки и применения ресурсоповышающих фторсодержащих присадок к смазочным материалам	191
Характеристика карбонофторидов	194
5.3.5. Требования к смазочным системам транспортных машин	199
5.4. Методы обеспечения высоких эксплуатационных свойств узлов трения.....	201
5.4.1. Специфика конструирования узлов трения	201
5.4.2. Основы расчетов при проектировании подшипников скольжения.....	209
5.4.3. Инженерные расчеты при использовании подшипников качения	214
Классификация подшипников качения.....	214
Расчет подшипников качения при статическом нагружении	214
Нагрузки на тела качения	217
Оценка предельной быстроходности подшипников качения.....	218
Расчет потерь на трение в подшипниках качения	219
Гидродинамический режим смазки подшипника качения.....	220
5.4.4. Основные принципы конструирования подшипниковых узлов.....	221
5.4.5. Новое направление в обеспечении надежности и высокого ресурса опор роторных систем - магнитный подвес	223
5.4.6. Оценка долговечности узлов трения методами теории вероятности	227
5.5. Технологические методы обеспечения высокой износостойкости узлов трения	230
Химико-термическая обработка (ХТО)	231
Поверхностная закалка	232
Электрохимические покрытия	234
Химическая обработка.....	235
Механотермическое формирование износостойких покрытий.....	237
Наплавка износостойких слоев.....	238
Напыление покрытий из порошковых материалов.....	239
Ионно-плазменные методы	240
Плакирование	241
Механическое упрочнение поверхностей.....	241
Характеристика электролитического осталивания.....	248
Основные элементы ресурсоповышающих мероприятий:	249
5.6. Обеспечение надежности узлов трения транспортных машин в эксплуатации	252
Система обеспечения надежности.....	252
Силовые платформенные стенды	256
Методы и средства диагностирования рулевого управления и элементов передней подвески.....	260
5.7. Новая техника для промывки деталей узлов трения	264
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.	266

Уважаемые читатели !

Главная мысль, которую мы старались провести через всю книгу, пожалуй, состоит в следующем.

Трибология своеобразна синтезом многих фундаментальных и технических дисциплин и требует от инженера более широкой осведомленности, чем знание узконаправленных дисциплин, например таких как Детали машин и т.п., которые имеют единую терминологию, понятийный аппарат и общую теоретическую базу механики деформируемого твердого тела. По этой причине мы полагали, что инженер-триболог и другие специалисты, занимающиеся проектированием, производством, испытаниями и эксплуатацией узлов трения, прежде всего, должны быть вооружены знанием физических основ и механики процессов, протекающих при трении, изнашивании и смазке.

Триботехнику мы рассматриваем как дело всей жизни трибологов, знания которых будут накапливаться в работе по созданию и эксплуатации все более совершенных узлов трения различных машин и механизмов.

Авторы выражают благодарность доценту канд. техн. наук Ковшову А.Г., с.н.с. Ибатуллину И.Д. и всем сотрудникам отдела надежности трибосистем НИИ проблем надежности механических систем Самарского ГТУ, а также сотрудникам кафедры физики Тверского ГТУ, научные работы которых широко использованы авторами во многих разделах книги.

И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский

ВВЕДЕНИЕ

Гибкость и мобильность автомобильного транспорта при сравнительно невысокой стоимости перевозок способствуют развитию промышленного производства, что призвано сыграть решающую роль в развитии новой экономики России. Поэтому одной из важнейших задач, стоящих перед транспортом Российской Федерации, является улучшение эксплуатационных свойств транспортных средств за счет повышения надежности, долговечности и экономичности. Значимость этой задачи постоянно возрастает из-за конкуренции с железнодорожными и другими видами перевозок и в связи с развитием сети шоссейных дорог.

Надежность и долговечность автомобильного и других видов транспорта во многом обусловлены явлениями трения и изнашивания, происходящими в узлах машин. Изнашивание приводит к нарушению герметичности узлов, теряется точность взаимного расположения деталей и перемещений. Возникают заклинивания, удары, вибрации, приводящие к поломкам. Трение приводит к потерям энергии, перегреву механизмов, снижению передаваемых усилий, повышенному расходу горючего и других материалов. Положительно роль трения необходима для обеспечения работы тормозов, сцепления, движения колес. Явления трения и изнашивания взаимно обусловлены: трение приводит к изнашиванию, а изнашивание поверхностей деталей в ходе работы приводит к изменению трения.

Для ликвидации последствий изнашивания проводятся текущие и капитальные ремонты, в ходе которых изношенные детали и узлы либо заменяют, либо восстанавливают. В процессе эксплуатации с изнашиванием борются путем проведения плановых техобслуживаний.

Даже в США в начале 90-х гг. затраты на ремонт автотранспортных средств составили около 24 млрд. долларов в год. В России же эти расходы (в ценах начала 90-х гг.) составили в среднем 40 млрд рублей. При этом установлено, что из-за износа и плохой регулировки теряется около 15% мощности двигателя. Изношенные ДВС выбрасывают в атмосферу большое количество СО, соединений свинца и других вредных веществ. В связи с этим обострена экологическая проблема применения ДВС. Простой автомобилей из-за технических неисправностей в среднем автохозяйстве достигают 30-40% календарного времени.

В силу сложившегося отставания от международного технологического уровня производства автомобильные ДВС у нас имеют весьма малый ресурс (дизельные двигатели - порядка 7500 моточасов). После ремонта ресурс сокращается до 2500-3000 ч. Автомобили (грузовые) за весь срок службы ремонтируют до 5 раз, как правило, в полукустарных условиях, что приводит к резкому снижению технико-экономических показателей. С учетом перечисленных обстоятельств, трудо-

затраты за срок службы автотранспорта распределены таким образом: 1,4% - на изготовление; 45,4% - на техническое обслуживание; 46% - на текущий ремонт; 7,2% - на капитальный ремонт.

Проблемы трения, износа и смазки в машинах изучает трибология. Прикладными задачами по повышению износостойкости и управлению трением за счет применения новых конструкций узлов, материалов и эксплуатационных приемов занимается триботехника.

Одним из стимулов для развития науки о трении, изнашивании и смазки явилось бурное развитие автомобилестроения и других видов транспортного машиностроения в начале XX века. К настоящему времени трибология окончательно оформилась, как самостоятельная отрасль знаний. Во всех развитых странах имеются научные трибологические центры, и ведется подготовка инженеров-трибологов. Решение проблем трения, изнашивания и смазки позволило добиться высокого экономического эффекта. По оценкам международных экспертов широкое внедрение достижений в этой области способно на треть сократить затраты на ремонт и эксплуатацию автотранспортных средств, причем на одну шестую без заметных капитальных вложений. Иллюстрацию прогресса в деле внедрения достижений трибологии в 90-х гг. дают данные, опубликованные по Великобритании.

Результаты внедрения по статьям	Годовой эффект, млн ф. ст.
Снижение потребления энергии	28
Сокращение ручного труда	10
Снижение затрат на смазочные материалы	10
Снижение затрат на обслуживание и ремонт	230
Исключение потерь, связанных с поломками	115
Интенсификация использования оборудования и повышение КПД	22
Экономия вложений за счет повышения долговечности	100
Итого:	515

Несомненно, что расширение применения достижений трибологии в нашей стране тоже позволит существенно повысить эксплуатационное качество транспортных средств и достигнуть значительных экономических и экологических результатов.

Считается, что основными направлениями работ по существенному повышению эксплуатационных свойств транспортных средств на основе использования трибологии являются следующие:

совершенствование конструкции узлов трения транспортных машин, снижение материалоемкости, веса, повышение надежности и ресурса;

применение новых материалов и технологий для повышения износостойкости и несущей способности пар трения;

разработка и применение смазочных материалов четвертого и пятого поколений, на которые уже переходят развитые страны;

использование экологически чистых методов эксплуатации, новых антифрикционных и фрикционных материалов с повышенными параметрами, не содержащих асбест, свинец, соединения тяжелых металлов и другие токсичные и канцерогенные вещества;

совершенствование конструкции уплотнений, обеспечивающих низкое трение, герметичность и исключают попадание абразива в сопряжения деталей;

ускорение перевода транспортных энергетических установок на более эффективные и экологически чистые энергоносители: топливный газ, электроэнергию, водород, солнечную энергию, применение энергоемких аккумуляторов энергии, как электрохимических, так и механических. Применение эффективных каталитических устройств газоочистки;

повышение образовательного уровня инженеров-конструкторов, технологов и эксплуатационников в области трения, износа, смазки и других проблем трибологии.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О КОНТАКТИРОВАНИИ И ТРЕНИИ СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В современной механике под трением понимают широкий круг явлений, вызываемых взаимодействием соприкасающихся поверхностей твердых тел при относительном перемещении, а также внутренним движением в твердых, жидких и газообразных средах при их деформации.

Первоначальное развитие получило изучение внешнего трения как силы сопротивления относительно движению соприкасающихся тел при трогании с места, скольжении, качении, верчении, при смазке в гидродинамическом режиме, образовании на поверхностях тонких слоев в несколько молекул (граничная смазка) либо в отсутствие смазки (сухое трение).

Внутреннее трение в твердых, жидких и газообразных средах подробно изучено в аэро- и гидродинамике и связано с необратимым рассеянием механической энергии, т.е. ее преобразованием во внутреннюю энергию.

В технике трение является инициатором деформационных, динамических, тепловых, акустических, электрических, адгезионных и других процессов, определяющих ресурс работоспособности узлов трения машин, их энергетику и эффективность.

Первичной проблемой при изучении трения является контактирование соприкасающихся поверхностей. В понятие контактирования входит взаимодействие поверхностей, принадлежащих твердым телам, под действием относительного смещения и сжимающих сил с учетом их отклонения от идеальной формы и влияния среды (газы и смазочные материалы), присутствующей в зоне контакта.

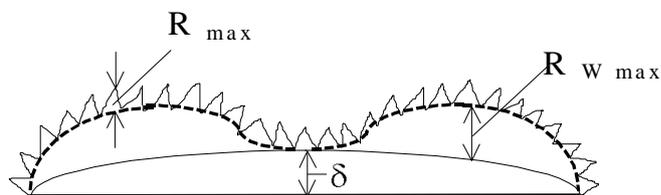
Отклонениями от идеальной формы, которые считаются макроскопическими, являются неплоскостность, извернутость, волнистость и т.п. Они обычно имеют масштаб, измеряемый в диапазоне $10^{-3} \div 10^{-4}$ м. Макроскопические неровности несут на себе микронеровности, измеряемые на уровне $10^{-5} \div 10^{-6}$ м. В свою очередь микронеровности имеют субшероховатость порядка молекулярных размеров.

В основе представлений о фрикционном взаимодействии шероховатых поверхностей лежит понятие о площади соприкосновения трущихся тел.

1.1. Анализ контактирования и оценка площади соприкосновения

При случайном расположении шероховатостей на поверхностях контактирующих тел контактное сближение этих тел под действием внешней нагрузки лимитирует фактическая площадь соприкосновения, определяемая геометрией контактирующих поверхностей.

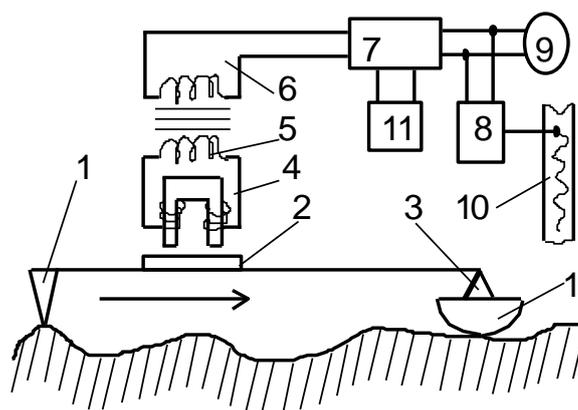
На рис. 1.1 показаны основные характеристики геометрии шероховатых поверхностей: шероховатость с максимальной высотой профиля R_{max} , волнистость с максимальной высотой волны R_{wmax} и макроотклонения от горизонтальной базовой плоскости с размером δ .



Р и с. 1.1. Основные характеристики геометрии шероховатых поверхностей

Для оценки шероховатости используются: оптические, щуповые, электронно-микроскопические и другие методы. Промышленное применение приобрел щуповой метод. Суть его заключается в том, что по поверхности скользит игла с радиусом закругления 2-10 мкм, значительно меньшим, чем радиус закругления вершин микронеровностей. Колебания иглы в вертикальном направлении преобразуются в электрические сигналы, поступающие в микропроцессор, который выдает в цифровом виде основные характеристики профиля. В России профилографы серийно выпускает завод «Калибр», а за рубежом наиболее распространены приборы фирмы «Хьюлет-Паккард».

На рис. 1.2 изображена схема современного профилографа. Игла 1 скользит по шероховатой поверхности и вместе с якорем 2 поворачивается относительно призмы 3, в результате чего меняется зазор между якорем 2 и сердечником 4, что генерирует переменный сигнал в катушках 5 и 6, который усиливается блоком 7 и регистрируется на ленте 10 самописца 8, а также стрелочным прибором 9. Микропроцессор 11 предназначен для вычисления стандартных показателей микрогеометрии, которые высвечиваются на цифровом табло. Для исключения влияния волнистости призма прибора прикреплена к шаровой опоре 12. Шаровая опора обеспечивает скольжение по вершинам микровыступов, огибая волны, поскольку если опора будет скользить по плоской гладкой поверхности, то одновременно будут записываться шероховатость и волнистость (см. рис. 1.1). Прибор позволяет изменять в широком диапа-



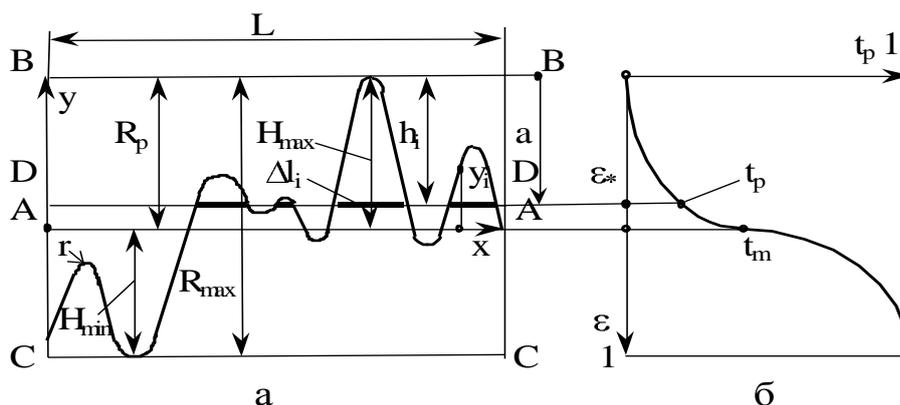
Р и с. 1.2. Схема профилографа

зоне масштаб увеличения по осям X и Y. Возможно увеличение по оси Y до 100000 раз.

В последние годы разработаны методы получения профилограмм на растровом, электронном и сканирующем (туннельном) микроскопах. Разрешение в этом случае достигает нанометров. Удастся регистрировать шероховатость молекулярных размеров (субмикрощероховатость), а также микродефекты кристаллической структуры.

Рассмотрим основные характеристики микрогеометрии более подробно, в соответствии с действующим в России ГОСТ 2789-73.

Установленные этим стандартом характеристики шероховатостей иллюстрирует рис. 1.3. Основные из них высотные: R_a , R_z и R_{max} и шаг микронеровностей.



Р и с. 1.3. Характеристики шероховатостей
а) - характеристики шероховатостей; б) - опорная кривая.

Наиболее часто в технике применяют характеристику R_a - среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля шероховатостей от средней линии в пределах базовой длины L :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (1.1.)$$

В формуле (1.1.) L - базовая длина, в пределах которой находится достаточно представительное число микронеровностей с точки зрения статистики; y_i - расстояние точки профиля от средней линии (см. рис. 1.3, а), n - число точек профиля, в которых измерено y_i . Положение средней линии AA находится из соображения о том, что она делит площадь профиля пополам ($\int_0^L y dx = 0$). Профиль заклю-

чен между линиями выступов BB и впадин CC , которые проводятся через вершины самых высоких выступов и самые низкие точки впадин.

Параметр R_z - характеризует среднее расстояние между пятью высшими вершинами выступов и пятью низшими точками впадин:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i\max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i\min}| \right). \quad (1.2)$$

Расстояние между линиями выступов и впадин (R_{\max}) равно толщине шероховатого слоя. Удаление линии выступов от средней линии обозначается R_p . Кроме перечисленных характеристик используются также средний шаг микронеровностей, средний угол наклона профиля, средний радиус закругления выступа.

По своей форме выступы напоминают пологие горные хребты. Угол при вершине для всех видов обработки обычно заключен в интервале от 150 до 176° . Наиболее близким по форме к реальному выступу является эллипсоид.

Обычно шероховатость имеет направленный характер, отражающий траекторию движения обрабатывающего инструмента. В связи с этим профилограммы снимают в продольном и поперечном направлениях. Средний радиус вершины выступа находят как среднегеометрическое из значений, измеренных в продольной и поперечной профилограммах:

$$r_{\text{ср.}} = \sqrt{r_{\text{ср. прод.}} \cdot r_{\text{ср. попер.}}} \quad (1.3)$$

Для статистического анализа и представления характеристик шероховатых поверхностей используют закон распределения материала по глубине шероховатого слоя на выбранной базовой длине L , который характеризует опорная кривая (см. рис. 1.3,б). Эту кривую получают как зависимость относительной суммы сечений микровыступов $t_p = \frac{1}{L} \sum_1^m \Delta L_i$ от относительного сближения $\varepsilon_* = \frac{a}{R_{\max}}$.

Для аналитического описания опорной кривой используют степенную функцию. Так, начальный участок опорной кривой (см. рис. 1.3,б) принято описывать выражением

$$t_p = t_m \varepsilon^v \quad (1.4)$$

Здесь $\varepsilon = a/R_p$, $t_m = t_p$ при $a = R_p$, $v > 1$ - параметры опорной кривой. Число выступов по мере удаления от верхней границы шероховатого слоя меняется по закону:

$$n = n_0 \left(\frac{a}{R_p} \right)^{v-1} \quad (1.5)$$

где n_0 - число выступов, вершины которых лежат выше средней линии.

Стандартом предусмотрено 14 классов шероховатости. В табл. 1.1. для примера приведены данные шероховатости наиболее ответственных деталей ДВС автомобилей.

Используя рассмотренные здесь стандартные характеристики, решают задачу оценки фактической площади контакта шероховатых поверхностей (ФПК).

На рис. 1.4 показана структурная схема площади контакта. Площадки фактического контакта ΔA_{fi} сгруппированы на площадях касания волн, совокупность которых составляет контурную площадь контакта ΔA_{ci} (КПК). Общая площадь со-

Таблица 1.1

Характеристики шероховатости

Наименование детали	Класс	R _a , мкм	r, мкм	R _{max} , мкм
Гильза цилиндра	9	0,04	100	1,2
Коленвал (шейки)	9	0,05	500	1,6
Поршневое кольцо	10÷11	0,02	270	0,48

прикасания тел (кажущаяся), в пределах которой заключены ФПК и КПК, называется номинальной площадью контакта A_a (НПК).

Суммарная площадь фактического контакта

$$A_r = \sum_1^n \Delta A_{ri}.$$

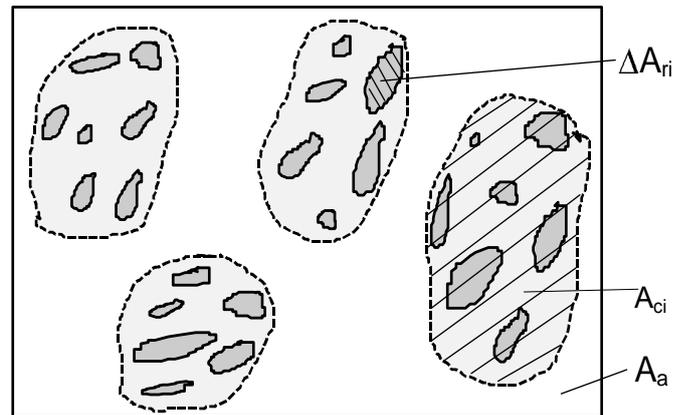
Наиболее полно методика расчета ФПК разработана профессором Н.Б. Демкиным (Тверской технической университет). В целях расчета ФПК шероховатость поверхности обычно моделируют набором сферических сегментов, вершины которых разбросаны по высоте таким образом, чтобы сохранить закон распределения материала в шероховатом слое, который задается с помощью полученной из опыта опорной кривой.

Рассмотрим по рис.1.5 контакт шероховатой поверхности с гладкой, что упрощает задачу, а результаты можно перенести на контакт двух шероховатых поверхностей. Поскольку в узлах трения деформация выступов невелика по сравнению с их размером, то можно пренебречь искажением формы и считать, что площадка контакта A_{ri} равна площади сечения выступа на расстоянии от вершины равном деформации a_i , которую называют сближением.

Рассмотрим сначала деформацию одного выступа (см. рис. 1.5). При упругой деформации ФПК и сближение рассчитываются по формулам Герца:

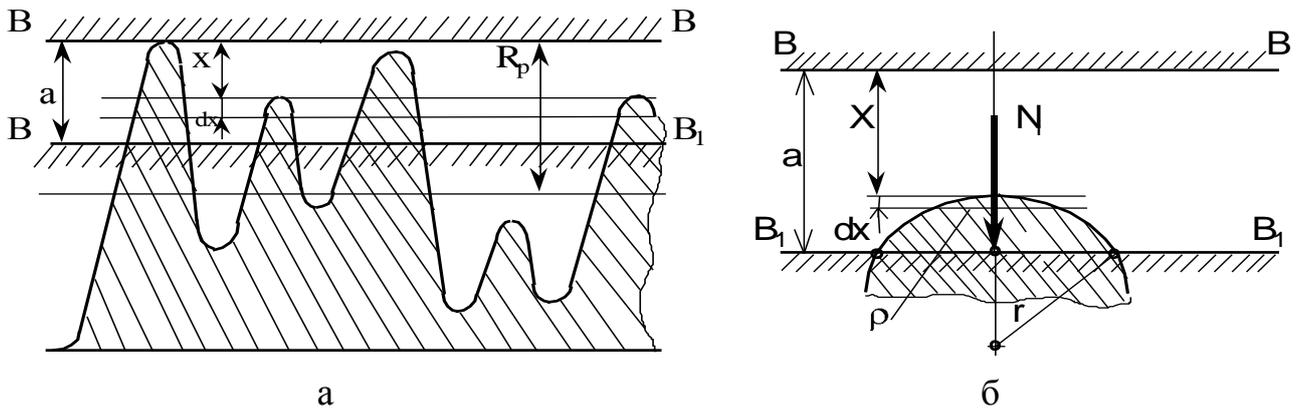
$$\Delta A_{ri} = 0,82\pi \sqrt[3]{N_i r}^{-2/3}; \quad (1.6)$$

$$a_i = 0,82 \sqrt[3]{N_i / \sqrt{r}}^{-2/3}. \quad (1.7)$$



Р и с. 1.4. Структурные компоненты реального контакта шероховатых поверхностей:

- A_a - номинальная площадь контакта;
- A_{ci} - контурная площадка;
- ΔA_{ri} - фактическая площадь единичного пятна контакта.



Р и с. 1.5. К анализу оценки фактической площади контакта

Здесь $j = \frac{1-\theta_1^2}{E_1} + \frac{1-\theta_2^2}{E_2}$ - упругая постоянная; θ_1, θ_2 - коэффициенты Пуассона; E_1, E_2 - модули Юнга для первой и второй поверхностей; N - нормальная нагрузка; r - радиус выступа. Если контактируют 2 сферических выступа, то $r = r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$ - приведенный радиус кривизны выступов.

При пластической деформации возможно либо внедрение, либо расплющивание выступа. Среднее давление на контакте считается равным твердости более мягкого материала. Тогда:

$$\Delta A_{\pi} = N_i / HB, \quad (1.8)$$

$$a_i = N_i / 2\pi r HB. \quad (1.9)$$

Здесь HB - твердость по Бринелю, которая определяется как частное от деления нагрузки на площадь отпечатка, оставшегося после внедрения твердого шарика в пластичный материал. Формула (1.9) получается из геометрических соображений (см. рис. 1.4, б):

$$\rho_i^2 = r^2 - (r - a_i)^2 \cong 2a_i r; \Delta A_{\pi} = \pi \rho_i^2 \cong 2\pi a_i r, \text{ отсюда } a_i \cong \Delta A_{\pi} / 2\pi r \cong N_i / 2\pi r HB$$

Образное представление площади ФПК иллюстрируют с помощью следующего приема. Если мысленно срезать шероховатости на уровне, соответствующем части высоты выступов, то сумму образовавшихся площадок в сечениях выступов можно считать равной ФПК. ФПК вычисляют, пользуясь уравнением опорной кривой (1.4), что справедливо, когда площадь сечения выступа равна площади контакта, при условии, что сближение равно расстоянию от вершины до секущей плоскости. Так, примерно, и происходит при пластической деформации. Из формул (1.6), (1.7) следует, что при упругой деформации площадь сечения по средней линии ΔA_{si} связана с площадью контакта A_{π} следующим образом:

$$\Delta A_{\pi} = \alpha \cdot \Delta A_{si}, \quad (1.10)$$

где коэффициент осадки $0,5 \leq \alpha \leq 1$. С учетом этого ФПК можно выразить через опорную кривую следующим образом:

$$A_r = \alpha A_s = \alpha A_c t_p = \alpha \cdot A_c \cdot t_m \varepsilon^v = \alpha A_{so} \left(\frac{a}{R_p} \right)^v. \quad (1.11)$$

Здесь учтено, что опорная кривая одинакова для профиля и поверхности, т.е.

$$t_p = \sum_1^m \Delta L_i / l = \sum_1^n \Delta A_{si} / A_c = A_s / A_c, t_m = A_{so} / A_c, A_{so} - \text{сумма сечений выступов на уровне средней линии, } A_c - \text{контурная площадь контакта.}$$

Прежде, чем приступить к расчету ФПК, проанализируем геометрию выступов шероховатости поверхностей. Для этого воспользуемся формулой (1.5) и рис.1.5.

Продифференцировав формулу (1.5), выразим число выступов, вершины которых лежат в слое dx (см. рис. 1.5,а):

$$dn = \frac{\psi - 1 \bar{n}_0}{R_p^{v-1}} x^{v-2} dx. \quad (1.12)$$

Из рис. 1.5,б выразим площадь сечения сферического выступа с вершиной в слое dx на уровне, удаленном на a от верхней границы:

$$\Delta A_s = 2 \pi r \sqrt{a - x}. \quad (1.13)$$

Площадь сечения всех выступов, вершины которых лежат в слое dx на упомянутом уровне,

$$dA_s = \Delta A_s \cdot dn = \frac{2 \pi R \psi - 1 \bar{n}_0}{R_p^{v-1}} \sqrt{a - x} x^{v-2} dx. \quad (1.14)$$

Площадь сечения всех выступов, рассеянных плоскостью, удаленной от верхней границы на величину a

$$A_s = \int_0^a dA_s = \frac{2 \pi r n_0 R_p}{v} \left(\frac{a}{R_p} \right)^v = A_{so} \left(\frac{a}{R_p} \right)^v. \quad (1.15)$$

Это соответствует формуле (1.11) при $\alpha = 1$. Следовательно, площадь сечения шероховатого слоя плоскостью, проходящей через среднюю линию,

$$A_{so} = \frac{2 \pi r R_p}{v} n_0 = \frac{2 \pi r R_p n_{oc}}{v} A_c. \quad (1.16)$$

Здесь $2 \pi r R_p = \Delta A_{smax}$ - площадь сечения самого высокого выступа, $2 \pi R_p / v = \overline{\Delta A_s}$ - средняя площадь сечения выступов на среднем уровне; n_{oc} - число выступов, вершины которых расположены выше среднего уровня в расчете на единицу контурной площади ($n_{oc} = n_0 / A_c$). Поскольку $A_{so} = t_m \cdot A_c$, то $n_0 = t_m \cdot A_c v / 2 \pi r R_p$, $n_{oc} = t_m v / 2 \pi r R_p$.

Идея расчета ФПК при упругом контактировании заключается в следующем. Шероховатый слой сжимается плоским гладким штампом от исходного положе-

ния ВВ до конечного В₁В (см. рис. 1.5). Каждый выступ деформируется на величину а-х. По формуле (1.7)

$$a - x = 0,82 \sqrt[3]{N_i / \sqrt{r}}^{2/3}.$$

Нагрузка на выступ, вершина которого лежит в слое dx,

$$N_i = \sqrt{r} (a - x)^{3/2} / 0,82^{3/2} j.$$

Нагрузка, сжимающая все такие выступы, с учетом (1.12) равна

$$dN = N_i dn_r = \sqrt{r} (1 - \bar{n}_{oc}) A_c x^{v-2} (a - x)^{3/2} / 0,82^{3/2} j R_p^{v-1} dx.$$

Общая нагрузка на контакте

$$N = \int_0^a dN = \sqrt{r} (1 - \bar{n}_0) A_c k / 0,82^{3/2} j R_p^{v-1} a^{v+0,5}. \quad (1.17)$$

Здесь $K = [1,5\Gamma(v-1)\Gamma(1,5)]/\Gamma(v+1,5)$; Γ - символ гамма-функции. Выразим из (1.17) сближение, и, подставив в формулу (1.15), с учетом (1.11), получаем выражение для ФПК:

$$A_r = \pi \left[\frac{0,74}{K_1} \left(\frac{r^{v+1} n_{oc} A_c}{v R_p^{v-1}} \right)^{2v} j \right]^{\frac{2v}{2v+1}} N^{\frac{2v}{2v+1}} = B N^{\frac{2v}{2v+1}}. \quad (1.18)$$

Здесь $K_1 = [1,5\Gamma(v+1)\Gamma(1,5)]/\Gamma(v+1,5)$. Через формулу (1.17) выразим сближение:

$$a = \left(\frac{0,74 R_p^{v-1} v \cdot j}{n_{oc} A_c \cdot r^{1/2} k_1} \right)^{\frac{2}{2v+1}} N^{\frac{2}{2v+1}}. \quad (1.19)$$

Формулы (1.18), (1.19) отражают влияние характеристик микрогеометрии, физико-механических свойств и нагрузки на показатели контактной деформации. Так, при изменении v от 2 до 3, что характерно для встречающихся на практике поверхностей, показатель степени нагрузки у A_r меняется от 4/5 до 6/7. При увеличении v зависимость ФПК от нагрузки стремится к линейной.

При пластическом контакте среднее давление на пятнах касания близко к твердости по Бринелю, поэтому ФПК выражается в виде

$$A_r = N/HB. \quad (1.20)$$

С учетом всего отмеченного, (см. формулы (1.11), (1.15) и (1.20) формула для вычисления сближения имеет вид

$$a = \left(\frac{v R_p^{v-1}}{2\pi r n_{oc} A_c H_B} \right)^{\frac{1}{v}} N^{\frac{1}{v}}. \quad (1.21)$$

Отметим, что для приработанных поверхностей узлов трения характерен упругий контакт. Пластический контакт может частично проявиться при первых нагружениях, когда сжимаются наиболее высокие выступы. Последующие нагружения происходят уже в условиях, приближенных к упругому контакту. Пластический контакт имеет место также при обработке материалов резанием, ковкой, штамповкой, прессованием, накаткой и др.

Расчеты показывают, что с целью упрощения вычислений контакт двух шероховатых поверхностей можно приводить к контакту шероховатой и гладкой поверхностей, если вместо параметров v , t_m , R_{max} , r использовать эквивалентные значения, характеризующие обе поверхности:

$$v_{\Sigma} = v_1 + v_2; \quad (1.22)$$

$$b_{\Sigma} = K_2 t_{m1} \cdot t_{m2} R_{p\Sigma}^{v_{\Sigma}} / R_{p1}^{v_1} R_{p2}^{v_2}; \quad (1.23)$$

$$R_{p\Sigma} = R_{p1} + R_{p2}; \quad (1.24)$$

$$r_{\Sigma} = r_1 r_2 / (r_1 + r_2). \quad (1.25)$$

Здесь $K_2 = \frac{d_1}{d_1 + 1} \frac{d_2}{d_2 + 1} \frac{1}{d_1 + v_2 + 1}$.

Индексы 1, 2 относятся к первой и второй поверхностям.

Если поверхности имеют ярко выраженную волнистость, то ее параметры определяют из волнограмм, снимаемых с помощью профилографов, и используют математическое описание, разработанное для шероховатого слоя. Контурную площадь контакта можно рассчитать по формуле

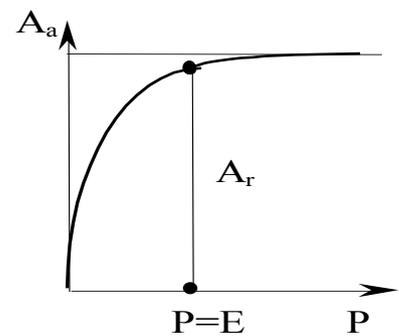
$$A_c = \left(\frac{2R_{max}}{H_B} \right)^{v+\omega} \left(\frac{r}{2R_{max}} \right)^{\omega} \left(\frac{2K_4 N A_a^{v_{\omega}}}{\alpha M} \right)^{\frac{v_{\omega}}{v_{\omega} + v + \omega}}. \quad (1.26)$$

Здесь H_B - наибольшая высота волны; A_a - номинальная площадь контакта; α и ω - коэффициенты, равные при упругом контакте 0,5, а при пластическом 1 и 0 соответственно; v_{ω} - параметр опорной кривой для волнистости; K_4 - постоянная интегрирования; M - характеристика механических свойств (при упругом контакте $M=0,43j$; при пластическом - $M \cong H_B$).

Если волнистость выражена слабо ($H_B \leq R_{max}$), то ею можно пренебречь и считать в формулах (1.18), (1.19), (1.21) $A_c = A_a$.

Отдельно остановимся на формировании ФПК резин, поскольку они широко используются в узлах машин и механизмов и, в особенности, в автотранспортных

средствах. Резины, независимо от природы (на основе натуральных или искусственных каучуков), имеют чрезвычайно низкий модуль упругости (порядка 5-30 МПа). Коэффициент Пуассона у них близок к 0,5, следовательно, даже при небольших давлениях они подчиняются закону Паскаля, ведут себя как жидкости. В отличие от твердых тел, уже при давлении порядка значения модуля упругости, фактическая площадь контакта у них приближается по величине к номинальной площади. На рис.1.6 показан примерный график зависимости ФПК от номинального давления.



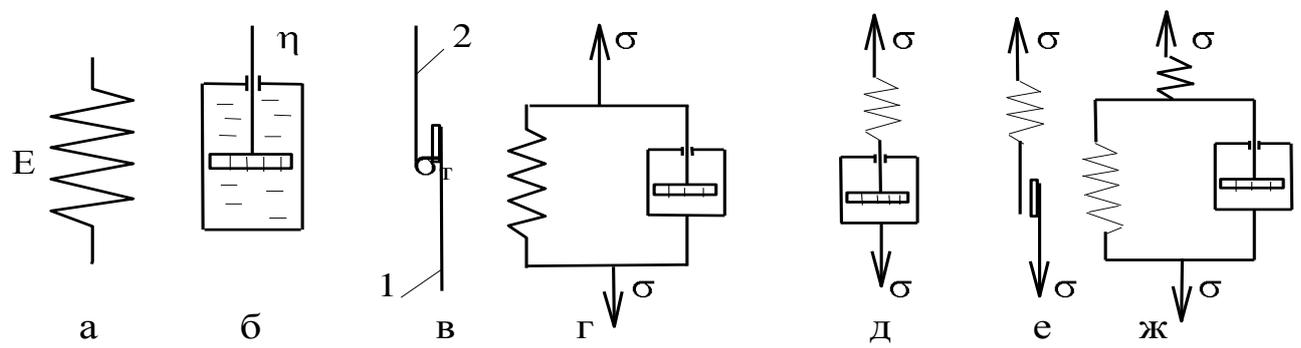
Р и с. 1.6. Зависимость площади фактического контакта резины от номинального давления

Величину ФПК можно рассчитать по уточненной формуле Бартенева Г.М. - Лаврентьева В.В.:

$$A_r = A_a \left[1 - K_1 e^{-\delta \sqrt{N/A_a} E^{-2/3}} \right], \quad (1.27)$$

где - $K_1=0,8 \div 1$; $\delta \cong 1,2(\alpha r/R_z)^{1/3}$; $\alpha = n_0/n_m$, n_m - число оснований выступов в расчете на единицу номинальной площади контакта; E - модуль упругости резины; n_0 - число выступов, пересеченных средним уровнем.

Приведенные формулы для расчета ФПК не учитывают влияния времени действия нагрузки и температуры. Все материалы в большей или меньшей степени обладают вязкоупругостью и вязкопластичностью, т.е. упругая и пластическая деформации возникают не мгновенно после нагружения, а развиваются во времени. Скорость нарастания деформации увеличивается с повышением температуры. Такое поведение материалов, приводящее к изменению ФПК в зависимости от температуры и времени, описывается с помощью реологических моделей в рамках науки реологии. На рис. 1.7,а,б,в представлены простейшие модели, описывающие отдельные стороны поведения материалов.



Р и с. 1.7. Реологические модели

Первая модель (см. рис.1.7,а) характеризует идеальную упругость (тело Гука). Для нее связь между напряжением (σ) и деформацией (ϵ) дается законом Гука:

$$\sigma = \epsilon E . \quad (1.28)$$

Вторая модель (см. рис.1.7,б) отражает вязкое течение (тело-Ньютона). Для нее применима формула Ньютона:

$$\sigma = \eta \frac{dV}{dz} = \eta \frac{dx}{dt \cdot dz} = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta \dot{\varepsilon} . \quad (1.29)$$

Здесь $\frac{dx}{dz} = d\varepsilon$ - относительная деформация сдвига.

Третья модель (см. рис.1.7,в) характеризует переход к пластической деформации (тело Сен-Венана):

$$\sigma = \sigma_T \text{sign} \dot{\varepsilon} , \quad (1.30)$$

где sign - обозначение ступенчато изменяющейся функции. Если $\sigma > \sigma_T$, то элементы 1, 2 являются одним целым ($\varepsilon = 0$), если $\sigma < \sigma_T$ - элементы скользят относительно друг друга, тело неограниченно пластически деформируется ($\varepsilon \rightarrow \infty$). Далее следуют комбинации из первых трех моделей (см. рис.1.7,г,д,е), отражающие в первом приближении свойства реальных тел. Первой (г) является модель Кельвина-Фойгта, учитывая, что общее напряжение здесь воспринимается телами Гука и Ньютона:

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_\eta = E \cdot \varepsilon + \eta \dot{\varepsilon} . \quad (1.31)$$

Считая $\sigma = \text{const}$ и интегрируя, получаем закон развития деформации во времени:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{E} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{E}{\eta} t \right) \right] . \quad (1.32)$$

Если в какой-то момент времени τ тело разгрузить ($\sigma = 0$), то интегрируя уравнение (1.31), получим закон снижения деформации во времени:

$$\varepsilon = \varepsilon_\tau \exp \left[\left(- \frac{E}{\eta} \right) (t - \tau) \right] . \quad (1.33)$$

Отношение $\frac{E}{\eta} = t_0$ называют временем релаксации.

Для модели Максвелла (Д) при приложении нагрузки сначала мгновенно деформируется тело Гука, а затем вступает в действие тело Ньютона. Поскольку тела соединены последовательно, то напряжения у них одинаковы. Скорость деформации системы складывается из скоростей для обоих тел:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_E + \dot{\varepsilon}_\eta = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} . \quad (1.34)$$

Если принять, что $\varepsilon = \text{const}$, интегрируя, получаем закон снижения напряже-

ния во времени:

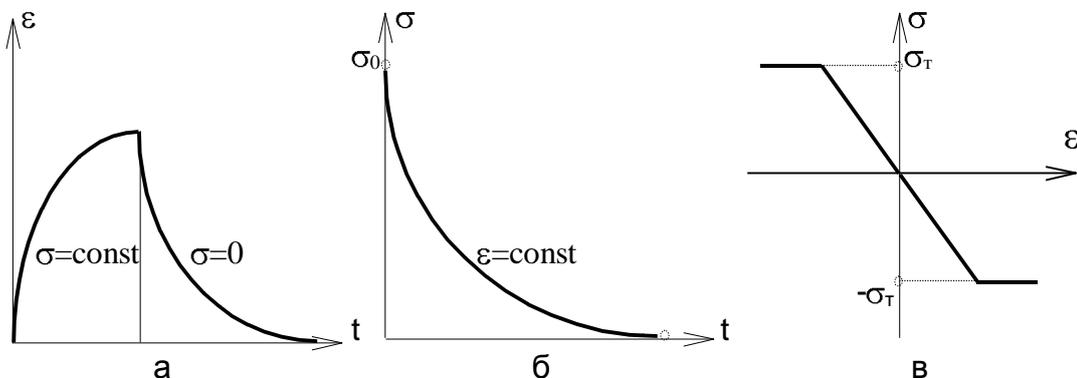
$$\sigma = \sigma_0 \exp\left[-\left(\frac{E}{\eta}\right)t\right], \quad (1.35)$$

где σ_0 - напряжение в начальный момент. Обе модели (см. рис.1.7,г,д) характеризуют поведение вязкоупругих тел.

Модель Прандтля -е характеризует поведение вязкопластичных тел.

$$\text{Для нее} \begin{cases} \sigma = E\varepsilon & \text{при } -\varepsilon_T < \varepsilon < \varepsilon_T; \\ \sigma = -\sigma_T \operatorname{sign} \varepsilon & \text{при } -\varepsilon_T \geq \varepsilon \geq \varepsilon_T. \end{cases} \quad (1.36)$$

Здесь ε - упругая деформация при $\sigma = \sigma_T$, σ_T - предел текучести. Пока $\sigma < \sigma_T$, деформируется только тело Гука. Как только $\sigma \geq \sigma_T$, деформация неограниченно нарастает из-за проскальзывания тела Сен-Венана при постоянной деформации упругого элемента. На рис. 1.8. изображены реологические кривые для моделей Кельвина-Фойгта, Максвелла и Прандтля. Однако поведение реальных материалов в зоне контакта оказывается обычно сложнее, чем для рассмотренных моделей, поэтому приходится создавать более сложные композиции. В качестве примера на рис. 1.7,ж приведена модель, использованная в работах А.Ю. Ишлинского и И.В. Крагельского для объяснения зависимости силы трения от скорости скольжения.



Р и с. 1.8. Реологические кривые

Влияние температуры и времени на ФПК наиболее заметно проявляется при пластическом контакте. Рост ФПК при повышении температуры в основном обусловлен снижением твердости, происходящим по экспоненциальному закону. Временная зависимость ФПК при постоянной нагрузке для металлов удовлетворительно описывается формулой

$$\Delta A_{\text{пт}} = N \left(t_2^m - t_1^m \right) / \text{НВ} \cdot t_{\text{НВ}}^m, \quad (1.37)$$

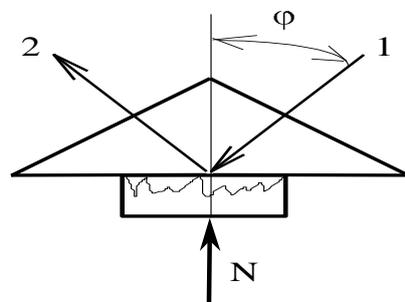
где $\Delta A_{\text{пт}}$ - изменение ФПК за промежуток времени $t_2 - t_1$, $t_{\text{НВ}}$ - время выдержки под нагрузкой шарового наконечника при определении твердости по Бринелю, m - реологическая постоянная материала.

Вкратце рассмотрим экспериментальные методы измерения ФПК. Все методы можно разделить на 2 группы: методы, основанные на изучении отиска поверхности, и методы, основанные на прямом или косвенном измерении площади в условиях контактирования. Первая группа методов легче реализуется, но требует нарушения контакта. Сюда относятся методы измерения с использованием индикаторных пленок люминофоров, радиоизотопов, красящих веществ, наносимых на одну из контактирующих поверхностей. Поверхности после контактирования разбирают и с помощью планиметра измеряют площадь пятен. Все методы имеют индивидуальные источники погрешностей. Наиболее точные результаты дают 3 метода: метод угольных пленок, метод оценки переноса атомов материала одной поверхности на другую и метод измерения площадок сжатия выступов при контакте шероховатого тела с гладким.

Первый метод наиболее прост и доступен. На поверхность одной из деталей пары, покрытой тончайшим слоем смазки, напыляется в низком вакууме тонкая (толщиной до 1 мкм) пленка угля. Затем на напыленную поверхность накладывают вторую деталь пары и сжимают их приложением нормальной нагрузки. В местах контакта пленка разрушается, и светлые пятна касания отчетливо видны на черном фоне. Их площадь легко измерить планиметрированием. Второй метод заключается в обследовании побывавшей в контакте поверхности на растровом электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором, который настраивается на материал контртела. Анализатор регистрирует пятна контакта, как совокупность перенесенных при взаимодействии атомов контр-тела. Третий метод основан на измерении площадок смятия выступов металлических шероховатых тел после их контактирования с плоской твердой гладкой поверхностью. Площадки видны, как зеркальные пятна на сером фоне. Измерения проводятся в автоматическом режиме с использованием телевизионных планиметров. Метод применим только в условиях пластического контакта.

Вторая группа методов позволяет измерять ФПК в условиях взаимодействия поверхностей. К ней относится метод нарушения полного внутреннего отражения (НПВО). Схема метода показана на рис. 1.9. Луч света 1 падает под углом, большим предельного, на грань прозрачной призмы и испытывает полное внутреннее отражение. К призме прижимается шероховатое тело. В местах контакта полное внутреннее отражение нарушается, и пятна контакта в лучах отраженного света 2 выглядят темными на светлом фоне. Применение метода ограничено узким выбором прозрачного материала, в качестве которого обычно используется стекло, обладающее низкой прочностью.

Другим методом является измерение электросопротивления контакта, по которому можно рассчитать ФПК. Здесь главным источником погрешности является наличие на поверхностях пленок окислов, проводимость ко-



Р и с. 1.9. Схема оптического метода оценки шероховатостей (метод НПВО)

торых много меньше, чем у металлов.

1.2. Трение скольжения

Под трением понимают сопротивление, возникающее при перемещении одного тела относительно другого, прижатого к первому. При этом различают трение покоя, скольжения и качения рис. 1.10.

Силой трения покоя (F_n) называют сдвиговое усилие, прикладываемое к контактирующим телам, и не вызывающее их взаимного скольжения (см. рис. 1.10,а). При этом взаимное перемещение (L_n) достигается за счет деформации материала выступов шероховатости в зоне контакта и называется предварительным смещением. Оно носит в основном упругий характер и исчезает при снятии сдвигающего усилия. Однако по мере роста сдвигающего усилия предварительное смещение приобретает пластический характер и становится частично необратимым. На рисунке показана предельная величина предварительного смещения (L_{nm}) и соответственно предельное значение силы трения покоя, которое называют статической силой трения. При дальнейшем увеличении перемещения начинается скольжение.

Силу трения можно представить в виде произведения удельной силы трения (τ) и фактической площади контакта (A_r):

$$F = \tau A_r. \quad (1.38)$$

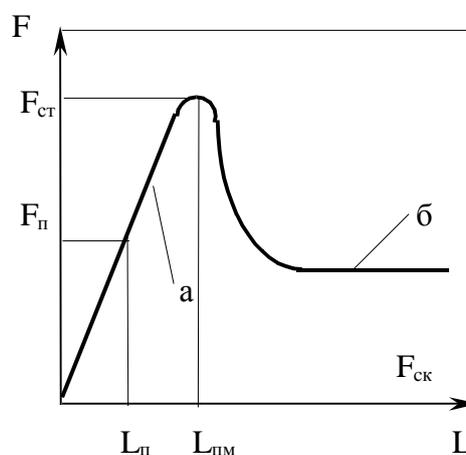
Под коэффициентом трения понимают отношение силы трения к действующему на контакте нормальному усилию:

$$\mu = F/N. \quad (1.39)$$

Здесь также различают коэффициенты трения покоя (статический) и скольжения (кинетический).

В зависимости от характера смазочной прослойки различают 4 вида трения: сухое, граничное, гидродинамическое (жидкостное) и смешанное (одновременно имеются элементы сухого, граничного и гидродинамического трения). В первом случае контактируют несмазываемые поверхности, покрытые окисными пленками и тончайшими слоями молекул газов и воды, адсорбированными из окружающей среды. Во втором случае, помимо перечисленных пленок, присутствуют молекулы смазочных материалов в виде тонкого слоя толщиной в несколько молекул, которые прочно связаны с поверхностью. В третьем случае слой жидкой смазки полностью разделяет сопряженные поверхности.

Сухое и граничное трения сходны по своей природе и имеют общие закономерности. Причиной служит то обстоятельство, что при граничном трении моно-



Р и с. 1.10. Характерные случаи формирования сил трения:
а - сила трения покоя;
б - сила трения скольжения

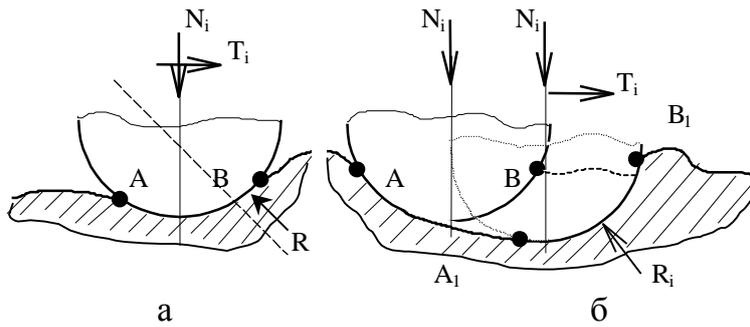
молекулярные слои смазки прочно связаны с твердой поверхностью, обладают твердообразными свойствами и как бы служат продолжением твердой фазы. Поэтому, как и при сухом трении, фактически имеет место контакт двух твердых поверхностей. Отличие проявляется в разных значениях коэффициента трения. Если при сухом трении он обычно больше 0,2, то при граничном его величина заключена в интервале 0,05-0,2.

Механизм возникновения трения объясняет молекулярно-механическая теория трения, в разработку которой внесли большой вклад российские ученые (Б.В. Дерягин, И.В. Крагельский и др.) и зарубежные (Боуден, Тейбор, Томлинсон и др.). В соответствии с этой теорией трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Силу трения можно представить как сумму молекулярной (адгезионной) и механической (деформационной) составляющих:

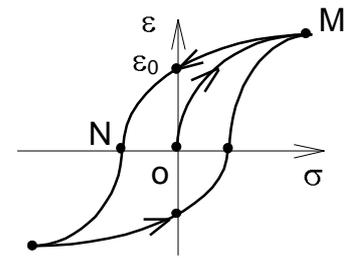
$$F = F_A + F_{\Delta} . \quad (1.40)$$

Молекулярная составляющая обусловлена сопротивлением разрыву молекулярных либо межатомных связей, которые возникают между контактирующими телами. Механизм этого процесса аналогичен описанному в гл. 2 для разрушения кристаллической решетки при сдвиге. Рассеяние работы трения в теплоту связано с упругой деформацией кристаллических решеток. Работа внешней силы переходит в потенциальную энергию решеток. После разрыва связи потенциальная энергия переходит в энергию колебаний атомов - во внутреннюю.

Механическая составляющая вызвана сопротивлением упругому и пластическому отеснению выступов контактирующих тел, внедрившихся при движении в контроповерхности (см. рис. 1.11).



Р и с. 1.11. Упругое и пластическое отгеснение материала при скольжении



Р и с. 1.12. Гистерезис

На рис. 1.11,а показано скольжение жесткого сферического выступа по вязкоупругому полупространству. Материал после прохода выступа из-за запаздывания деформации по отношению к нагрузке не успевает восстанавливать форму. Поэтому выступы перед индентором и после несимметричны, а реакция опоры, приложенная в центре контактной поверхности, не совпадает по направлению с нормальным усилием. Это явление характеризуется гистерезисом деформации. На рис. 1.12 показана кривая гистерезиса при растяжении-сжатии вязкоупругого стержня. Кривая ОМ отражает процесс нагружения, а кривая МN - процесс разгрузки. Из-за запаздывания деформации в тот момент, когда напряжение равно нулю, деформация не исчезает и равна ϵ_0 . Поэтому след, оставшийся при движении выступа, не успевает восстанавливаться полностью, чего следовало бы ожидать для идеальной упругой среды.

На рис. 1.11,б показано поведение жесткого выступа при скольжении по пластической среде. В начале, пока скольжение отсутствует, под действием нормального усилия выступ заглубляется. Контактная кривая АВ симметрична. При скольжении задняя граница выступа отрывается от лунки. Вся нагрузка сосредотачивается на передней границе, а дуга контакта занимает положение A_1B_1 . Впереди возникает валик отгесняемого материала. Реакция опоры не совпадает по направлению с нормальным усилием.

Поскольку молекулярное и механическое взаимодействие осуществляется на ФПК, то сила трения выраженная формулой (1.40) записывается в виде

$$\tau = \frac{F}{A_T} = \tau_A + \tau_{\Delta}, \quad (1.41)$$

где τ_A, τ_{Δ} - адгезионная и деформационная составляющие удельного усилия.

Многочисленные попытки вывести расчетное соотношение для адгезионной составляющей (τ_A) не увенчались успехом из-за невозможности учесть влияние пленок вторичных структур, покрывающих поверхности. В то же время для ювенильных металлических поверхностей установлено, что при их контакте решетки материалов обеих поверхностей срачиваются (холодная сварка), и удельная сила трения близка к сопротивлению сдвигу решетки. Последние исследования пока-

зали, что на физических площадках контакта, обусловленных смятием субмикронеровностей, сопротивление сдвигу контактирующих кристаллов приближается к теоретической прочности. Однако для реальных поверхностей, покрытых пленками, адгезионная составляющая значительно ниже. Работы Б.В. Дерягина, И.В. Крагельского, Н.М. Михина и др. показали, что зависимость адгезионной составляющей удельной силы трения от фактического давления ($\sigma_r = N/A_r$) выражается в виде двучленного закона:

$$\tau_A = \tau_0 + \beta \sigma_r, \quad (1.42)$$

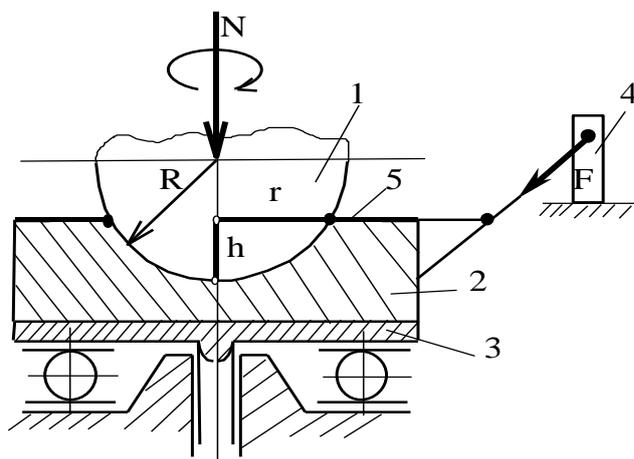
где τ_0 и β - молекулярные константы трения, определяемые экспериментально. Для определения этих констант Н.М. Михиным и К.С. Ляпиным разработан специальный прибор - тангензиометр, схема которого представлена на рис. 1.13.

Сферический индентор 1 внедряется в образец 2 на глубину h . Образец прикреплен к установленной в подшипнике подставке 3. Индентор приводится во вращение и за счет трения увлекает за собой образец 2. Однако образец удерживается от вращения пружиной 4, с которой он связан. Пружина служит для измерения момента трения. По величине момента рассчитывается удельная сила трения. Для этой цели измеряется радиус лунки (r). Фактическое давление вычисляют как отношение нормального усилия к площади отпечатка. Для того, чтобы площадь отпечатка равнялась ФПК, в качестве индентора используют шарики, поверхность которых является зеркально гладкой, а поверхность образца подвергают тщательной полировке. При использовании этого метода возникает затруднение, заключающееся в том, что фактическое давление равно твердости. Следовательно, для данного образца можно получить только одно значение удельной силы трения. Для получения зависимости необходимо, чтобы твердость изменялась в широком диапазоне. Это достигается за счет применения 5-6 образцов из материалов с разной твердостью. Испытуемый материал 5 наносится на эти образцы в виде гальванического покрытия либо в виде фольги, прочно прикрепляемой к поверхности образца. Такой прием позволяет получить зависимость $\tau(\sigma_r)$, вид которой показан на рис. 1.14.

Обрабатывая результаты измерений, определяют молекулярные константы τ_0 и β .

Из формулы (1.40) видно, что адгезионную составляющую силы трения можно представить в виде

$$F_A = \tau_A A_r = \tau_0 A_r + \beta \sigma_r A_r = \tau_0 A_r + \beta N. \quad (1.43)$$



Р и с. 1.13. Схема тангензиометра

Адгезионная составляющая коэффициента трения

$$\mu_A = \frac{F_A}{N} = \tau_0 A_r / N + \beta. \quad (1.44)$$

Если деформация выступов упругая, то, подставляя выражение ФПК из формулы (1.18) в формулу (1.44), получаем

$$\mu_A = \frac{\tau_0 B}{\frac{1}{N^{2\nu+1}}} + \beta. \quad (1.45)$$

С повышением нормального усилия коэффициент трения убывает. Для пластического контакта, используя формулу (1.20) получаем

$$\mu_A = \frac{\tau_0}{HB} + \beta = \text{const}. \quad (1.46)$$

Коэффициент трения не зависит от нагрузки.

Рассмотрим механическую составляющую на примере пропахивания цилиндрическим выступом пластического полупространства (см. рис. 1.15).

Цилиндрический выступ заглублен на h в полупространство. Реакция со стороны отесняемого материала

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{F}_c,$$

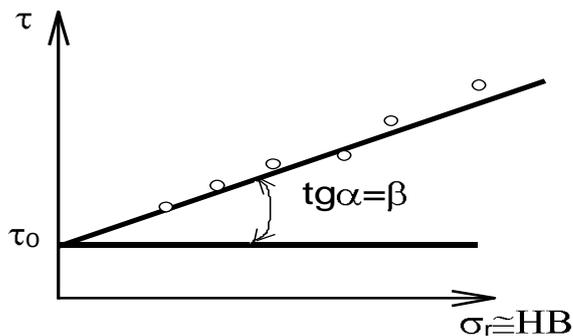
где N^1 - вертикальная составляющая равна нормальной нагрузке; F_c - горизонтальная составляющая равна механическому сопротивлению. Поскольку деформация пластическая, то

$$N^1 \cong S_{BCFE} \cdot HB; F_c \cong S_{ABCD} \cdot HB.$$

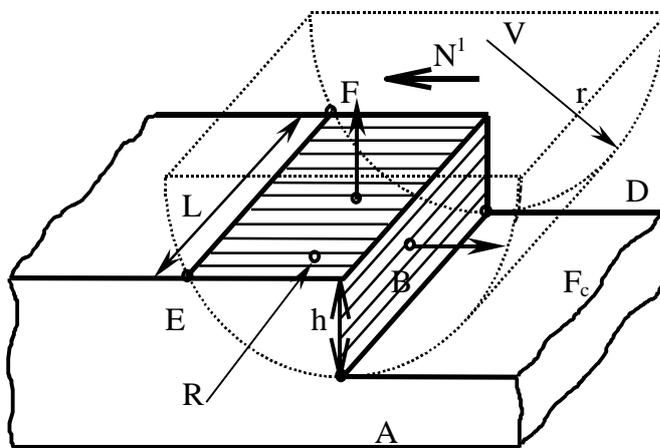
Коэффициент трения (механическая составляющая)

$$\mu_\Delta = F_c / N^1 = S_{ABCD} / S_{BCFE};$$

$$E \cong \sqrt{2hr}; S_{BCFE} = BE \cdot L; S_{ABCD} = hL.$$



Р и с. 1.14. Зависимость силы трения τ от фактического напряжения σ_r



Р и с. 1.15. Расчетная схема пропахивания цилиндрическим выступом пластического полупространства

Таким образом, для цилиндрического выступа $\mu_{\Delta} \cong 0,7\sqrt{\frac{h}{r}}$, для сферического выступа $\mu_{\Delta} \cong 0,55\sqrt{\frac{h}{r}}$.

При переходе к множественному контакту силу трения находят в виде суммы сил по всем контактирующим выступам:

$$F = \int_0^{nr} F_1 dn_r.$$

Проведя такую операцию для пластического контакта, получаем

$$\mu_{\Delta} = 0,55K_{v\pi}\sqrt{\frac{a}{r}}, \quad (1.47)$$

где a - сближение поверхностей при скольжении, $K_v = 0,75\sqrt{\pi}\Gamma \ll + 1 \bar{\Gamma}(v + 1,5)$.

Для вязкоупругого контакта

$$\mu_{\Delta} = 0,19\alpha_r K_{vy}\sqrt{\frac{a}{r}}, \quad (1.48)$$

где $K_{vy} = 2,67\Gamma \ll + 1,5 \bar{\Gamma}\sqrt{\pi}\Gamma \ll + 2 \underline{\alpha}_r \cong 3\alpha$ - коэффициент гистерезисных потерь в условиях трения; α - коэффициент гистерезисных потерь, измеренный при циклическом растяжении-сжатии стержня. Коэффициент гистерезисных потерь вычисляется как доля рассеянной в теплоту энергии за деформационный цикл. Величина α_r для металлов невелика (0,02-0,04) и значительно выше для пластмасс и резины (0,08-0,2).

Многочисленные исследования показали, что для металлов деформационная составляющая коэффициента трения примерно в 100 раз меньше, чем адгезионная. Поэтому коэффициент трения в первом приближении равен адгезионной составляющей. Несколько иначе дело обстоит для пластмасс и резин. В последнем случае различие снижается более, чем на порядок, и, если резина скользит по грубо обработанной поверхности, деформационной составляющей пренебрегать не следует.

Важной особенностью резин является быстрое насыщение площади контакта при сравнительно низкой нагрузке (см. рис. 1.6). Благодаря высоким значениям (K_{vy}) при низком номинальном давлении коэффициент трения резин велик и может превышать единицу. Однако с ростом давления он быстро снижается, особенно, когда ФПК становится равна НПК и при давлении порядка 50-100МПа составляет 0,05-0,02.

Для измерения силы трения применяют различные трибометры. На них изучают трение образцов в виде дисков, контактирующих торцами; цилиндров, контактирующих по образующей, и т.д. Наиболее простым и часто используемым является трибометр, схема которого изображена на рис. 1.16.

Образец 1 прикрепляется к пружинному динамометру 3 и прижимается к контртелу 2, приводимому в движение. Динамометр измеряет силу трения. Прибор позволяет исследовать влияние на трение шероховатости поверхностей, материалов пары трения, нормальной нагрузки, скорости скольжения, температуры, смазки и многих других факторов.

1.3. Влияние скорости скольжения и температуры на свойства контакта и фрикционные колебания

В работе [2] приведены основные реологические модели, характеризующие поведение материалов в зоне контакта. Рост ФПК и силы трения в зависимости от времени неподвижного контакта объясняет схема И.В. Крагельского и А.Ю. Ишлинского, приведенная на рис. 1.7,ж.

Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения V в виде экспоненциальной функции предложили И.В. Крагельский и В.С. Щедров:

$$f = a + bV e^{-cv} + d . \quad (1.49)$$

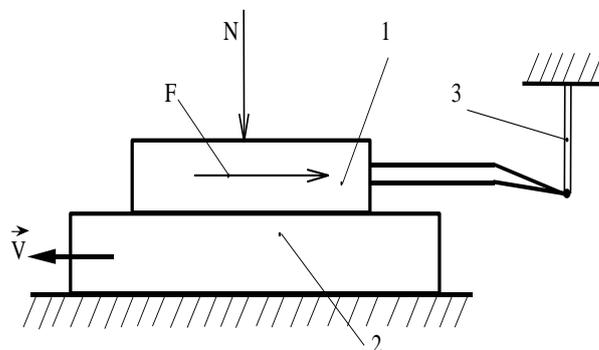
Параметры a , b , c , d характеризуют режим скольжения и свойства материалов пары трения. Параметр a зависит от физических свойств материалов и шероховатости, b и c зависят от вязкости и нагрузки, d зависит от конструкции узла трения и режима скольжения. Однако влияние скорости на свойства контакта при небольшом ее изменении само по себе невелико.

Но существенный рост скорости приводит к значительному повышению температуры контакта, поскольку мощность трения ($F \cdot V$) превращается в теплоту. Рост температуры в свою очередь вызывает заметное изменение свойств материалов в зоне контакта, резко снижается твердость. Поскольку увеличивается ФПК, снижается интенсивность молекулярного взаимодействия (τ_0 , β), происходят химические превращения в поверхностных слоях. При очень больших скоростях скольжения возможно оплавление поверхности, и сухое трение переходит в гидродинамическое. В общем случае наблюдается снижение коэффициента трения с ростом температуры.

Теория тепловых процессов, протекающих при трении, в России наиболее полно разработана профессором А.В. Чичинадзе и его научной школой. В соответствии с этой теорией максимальную температуру на пятне контакта можно представить в виде суммы:

$$T_{\max} = T_0 + T_V + T_S + T_B , \quad (1.50)$$

где T_0 - исходная температура пары трения, T_V - средняя объемная темпера-



Р и с. 1.16. Схема трибометра

тура элемента пары, T_S - средняя температура на номинальной (контурной) площади контакта, T_B - температурная вспышка на пятне контакта. Эти факторы опосредованы теплопроводностью пары трения.

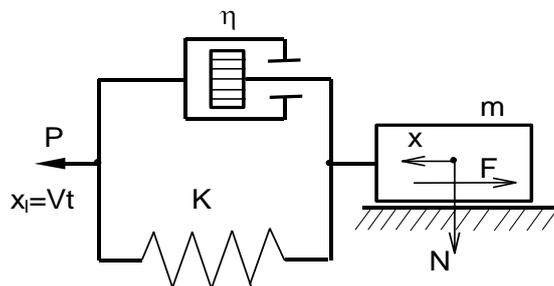
Задачу теплопроводности обычно формулируют в следующем виде: найти распределение температур в элементах пары трения, когда на контакте действует переменный по времени и положению источник теплоты, а со свободных поверхностей происходит теплоотдача в окружающую среду. При этом учитывают изменение теплофизических характеристик материалов в зависимости от температуры. Решение задачи позволяет рассчитать T_V , T_S , T_B в условиях работы тормозов, сцепления и других узлов трения. Расчеты и эксперименты показали, что T_{max} может, даже при сравнительно небольших скоростях, достигать сотен градусов, что приводит к заметным изменениям свойств материалов в тонком поверхностном слое.

При работе разных механизмов часто возникают колебания, связанные с трением. Они приводят к появлению скрипов, которые проявляются при движении (скрип колес, тормозов, скрип протекторов автомобилей, когда машина идет юзом и др.). Такие колебания называют фрикционными. Причинами колебаний являются реологические свойства контакта, а также упругие свойства элементов пары трения и их связей с другими деталями. Главным проявлением реологии контакта является рост ФПК, а следовательно, и статической силы трения с увеличением времени неподвижного контакта и скачкообразное падение силы трения при переходе от покоя к движению, а затем падение силы трения с ростом скорости скольжения, вызванное, главным образом, скачком температуры на пятнах контакта. Динамическая модель такой системы изображена на рис. 1.17.

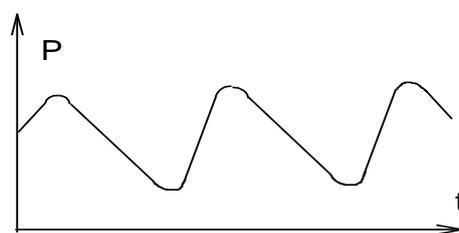
Модель представляет собой последовательно соединенные тела Кельвина-Фойгта и Сен-Венана. Если в целях упрощения принять, что $\eta=0$, $\mu=const$, то 2-й закон Ньютона для колебаний ползуна запишется в виде:

$$m \ddot{x} = -k x - Vt \dot{x} + \mu N \text{sign } \dot{x} = 0. \quad (1.51)$$

Решение этого уравнения позволяет найти законы движения ползуна и колебаний тягового усилия. На рис. 1.18 показан примерный график колебаний тягового усилия. Наиболее обстоятельные теоретические решения в этой области выполнены в МГТУ им. Баумана Ф.Р. Геккером и его учениками.



Р и с. 1.17. Схема модели фрикционных колебаний

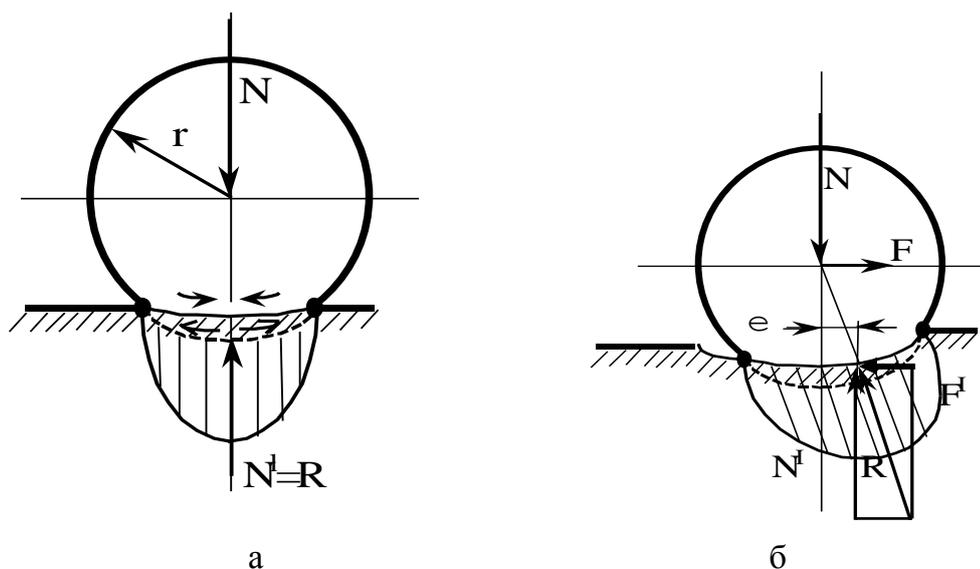


Р и с. 1.18. График колебания тягового усилия

В зависимости от уровня гашения (вязкости системы μ) колебания могут существовать либо не возникать. От этого зависит устойчивость, надежность и долговечность механических систем, что необходимо учитывать при проектировании механизмов и замене деталей при ремонте и техобслуживании.

1.4. Трение качения

Если бы колесо, катящееся по основанию, не испытывало проскальзывания, то такое движение было бы чистым качением и путь, проходимый любой точкой поверхности колеса по основанию за один оборот, составлял бы $2\pi r$. Однако качения без проскальзывания не бывает. Колесо и основание испытывают упругие деформации. При этом колесо в зоне контакта сжимается, а основание - растягивается (стрелки на рис. 1.19,а).



Р и с. 1.19. Взаимодействия колеса с опорой

Поэтому на контакте постоянно происходит проскальзывание колеса относительно основания. Это один из источников рассеяния энергии. Другим источником является вязкоупругое поведение материалов основания колеса. Если к оси колеса не приложено тяговое усилие, то дуга контакта симметрична (см. рис. 1.19,а), и реакция опоры соосна с нормальной нагрузкой. Если приложить тяговое усилие и колесо приходит в движение, то зона контакта искажается (см. рис. 1.19,б). Материал сзади колеса не успевает восстановить форму. Эпюра давлений смещается в сторону движения. Большая часть дуги контакта оказывается во фронтальной части. Реакция опоры распределяется на 2 составляющих: вертикальную

($N^1 = - N$) и горизонтальную (F^1) которая представляет собой сопро-

тивление перекачиванию.

Поскольку из условия равновесия $Ne = Fr = M_c$, то коэффициент трения качения

$$\mu_k = \frac{M_c}{N} = e, \quad (1.52)$$

где e - эксцентриситет - смещение центра опорной поверхности от вертикали (см. рис. 1.19,б). Наряду с этой характеристикой используется коэффициент сопротивления качению, равный отношению работы на единичном пути к нормальной нагрузке. Работа при повороте на угол $d\varphi$ равна $Md\varphi$, а пройденный путь - $\Delta l = rd\varphi$. Тогда коэффициент сопротивления

$$K_c = Md\varphi / Nrd\varphi = e/r. \quad (1.53)$$

Это выражение было получено Кулоном. Дальнейшие исследования показали, что эксцентриситет не является константой и $K_c \sim 1/r^n$, причем $n < 1$.

Далее было установлено, что проскальзывание вносит незначительный вклад в потери энергии, а главный источник потерь - вязкоупругие деформации катка и опоры. Рассеивание энергии связано в основном с гистерезисом деформации. Исходя из этих соображений, для цилиндрического катка

$$\mu_k = 0,24\alpha_r (q \cdot r \cdot j)^{1/2}, \quad (1.54)$$

где q - нагрузка, приходящаяся на единицу длины. Более детально задача о качении жесткого цилиндра по вязкоупругому полупространству решена академиком А.Ю. Ишлинским. Свойства полупространства описаны реологической моделью Кельвина-Фойгта (см. рис. 1.7,г). Для малых скоростей качения

$$\mu_k = C_1 V, \quad (1.55)$$

а для больших скоростей

$$\mu_k = C_2 \sqrt{rN}^{1/2} / \sqrt{V}. \quad (1.56)$$

При малых скоростях коэффициент трения качения увеличивается с повышением скорости, а при больших - уменьшается.

Дальнейшее развитие теории трения качения получила в работах И.Г. Горячевой, которая рассмотрела качение вязкоупругих тел при наличии на площадке контакта зон сцепления и проскальзывания. Она показала, что в случае одинаковых материалов зона сцепления располагается на фронтальной части дуги контакта, а проскальзывание - на тыльной.

1.5. Гидродинамическое трение

Гидродинамическое (жидкостное) трение характеризуется тем, что трущиеся поверхности разделены слоем масла. Минимальная толщина слоя должна быть больше, чем суммарная высота наиболее высоких микронеровностей обеих поверхностей: $h_{\min} \geq (R_{\max 1} + R_{\max 2})$. Масло является вязкой жидкостью. Сила внутрен-

него трения выражается формулой Ньютона:

$$F = \eta \frac{dV}{dz} S, \quad (1.57)$$

где η - динамическая вязкость; dV/dz - поперечный градиент скорости; S - площадь сдвига слоев смазки. Если скорость в направлении, перпендикулярном течению, по мере заглубления меняется по линейному закону (см. рис. 1.20), то $dV/dz=V/h$.

В таком случае формулу (1.57) можно записать в виде

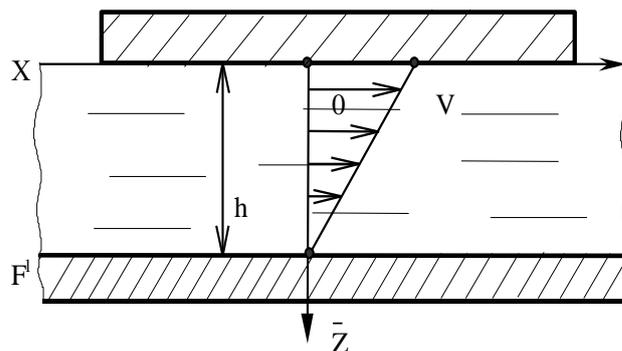
$$F = \eta V S / h. \quad (1.58)$$

Вязкость масла зависит от температуры и давления. С ростом температуры наблюдается резкое снижение вязкости. Повышение давления приводит к слабому увеличению вязкости. Русский инженер Н.П. Петров (1836-1920) рассмотрел сопротивление вращению вала в подшипнике при постоянном зазоре $h = \text{const}$ (см. рис. 1.21, а). Для этого случая в формуле (1.57) вместо S можно подставить $2\pi rL$ и вместо V - ωr . Тогда получим формулу Петрова для расчета момента трения

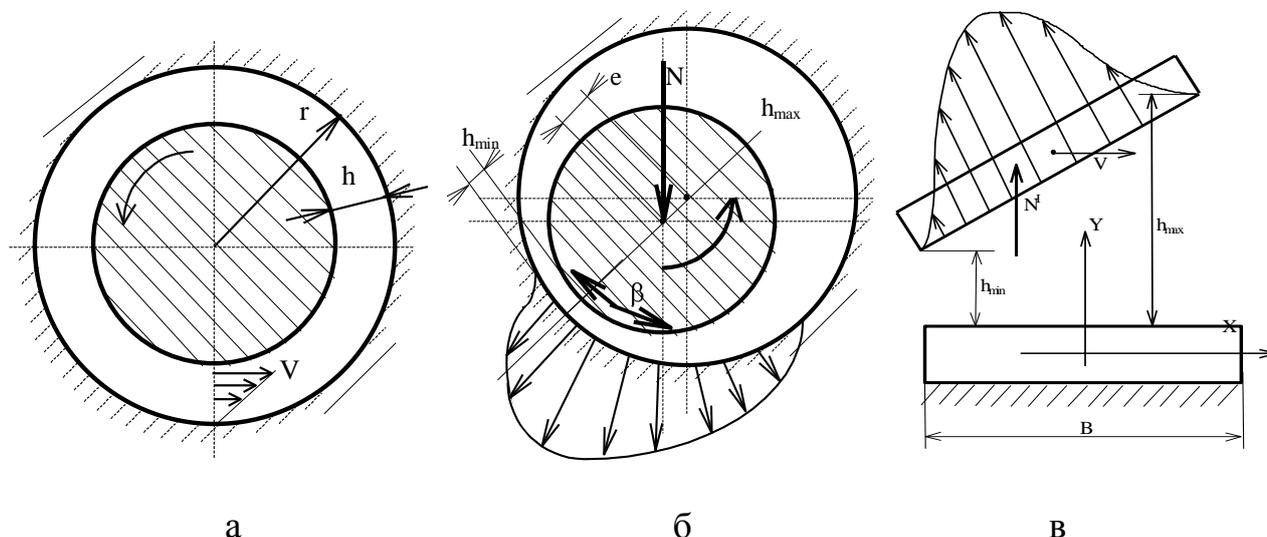
$$M = F \cdot r = 2\pi \eta \omega R^3 L / h. \quad (1.59)$$

Коэффициент трения $\mu = (2\pi r/h) \cdot \eta v / q$.

Здесь L - длина подшипник; ω - угловая скорость вала; $h \ll r$. Из формулы видно, что момент трения увеличивается с ростом вязкости, угловой скорости, радиуса, длины подшипника и с уменьшением зазора. Наиболее сильно влияет радиус подшипника.



Р и с. 1.20. Линейный закон распределения скоростей в потоке



Р и с. 1.21. Схемы гидромеханики подшипников

Если постоянство зазора не поддерживать искусственным путем, то вал опустится под действием силы тяжести. Зазор снизу начнет убывать. Здесь в действие включается гидродинамический эффект. Гидродинамический эффект заключается в том, что вал захватывает за счет смачивания масло и нагнетает его в сужающийся по направлению движения клиновидный зазор. Внутри масляного клина возникает добавочное давление, эпюра которого показана на рис. 1.21,б.

Вал всплывает при некоторой толщине смазочного слоя, когда в результате саморегулирования устанавливается минимальный зазор нагруженной зоны подшипника, соответствующий действующей нагрузке N :

$$h_{\min} = k \cdot r \cdot \eta \cdot v / q, \quad (1.60)$$

где K - коэффициент, $g = N/L$ - погонная нагрузка.

Минимальный зазор возникает в сечении, смещенном на угол β . Для того чтобы выразить подъемную силу масляного клина, силу вязкого трения и минимальную толщину зазора, необходимо решать уравнение Рейнольдса. Для жестких элементов пары трения, несжимаемой жидкости и стационарного течения это уравнение в интегральной форме имеет вид

$$dp/dx = 6\eta v(h-h_0)/h^3. \quad (1.61)$$

Здесь h_0 - толщина зазора в области максимального давления; h - текущая величина зазора. Решение уравнения Рейнольдса редко удается получить в аналитическом виде. Оно выполняется обычно численными методами. Аналитическое решение, полученное для скольжения одной пластины по другой (см. рис. 1.21,в), имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} N &= 6\eta VB \left[\frac{K-2}{K-1} \sqrt{\frac{K-1}{K}} + 2 \sqrt{\frac{h_{\min}^2}{K-1}} \right], \\ F &= 2\eta VB \left[\ln K - 3 \frac{K-1}{K} \sqrt{\frac{K-1}{K}} + 2 \sqrt{\frac{h_{\min}^2}{K-1}} \right], \\ \mu &= F/N = 2BL \frac{v}{q} \left[\ln K - 3 \frac{K-1}{K} \sqrt{\frac{K-1}{K}} + 2 \sqrt{\frac{h_{\min}^2}{K-1}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.62)$$

Здесь $K = h_{\max}/h_{\min}$.

Входящую в формулы (1.60), (1.62) безразмерную величину $\lambda = \eta v / q$ называют характеристикой подшипника. Зависимость коэффициента трения от характеристики называют диаграммой Герси-Штрибека (см. рис. 1.22).

При значении λ^* , соответствующем минимуму коэффициента трения, происходит переход от граничного трения к жидкостному. На этом же графике изображена кривая интенсивности изнашивания. При $\lambda > \lambda^*$ контакт деталей размыкается, и износ исчезает.

Разновидностью гидродинамической является эластогидродинамическая смазка. Высокие давления в масляном клине вызывают упругую деформацию контактирующих тел. В результате величина зазора между деталями возрастает. Особенно сильно этот эффект проявляется при трении тел, материал которых имеет низкий модуль упругости, например для резиновых колес автомобилей. На рис. 1.23 показан эластогидродинамический эффект при качении колеса по жесткому

основанию. За счет эластогидродинамического эффекта смазка образует прослойку между колесом и основанием.

Так происходит при движении автомобиля по залитому водой асфальту при скорости более 70 км/ч. Явление называют глиссированием. Автомобиль становится неуправляемым со всеми вытекающими последствиями.

При проектировании гидродинамических подшипников жидкостного трения самый эффективный режим наблюдается при явлении так называемого «стеклования» смазки.

Согласно опубликованным данным явление стеклования проявляется при давлении в смазочном слое $P_c=400...2500$ МПа.

Упруго-гидродинамическое состояние пленки смазки в такой ситуации определяют три фактора: давление, сдвиг и температура.

Напряжения сдвига при стекловании описывают двучленным выражением:

$$\tau_{\text{стекл.}} = \tau_{\text{пред.}} + C\Delta P, \quad (1.63)$$

где $\tau_{\text{пред.}}$ - предельное напряжение сдвига; C - коэффициент, близкий по значению к коэффициенту трения при граничной смазке; ΔP - параметр, определяющий превышение действующего давления в контакте над значением давления при стекловании P_c .

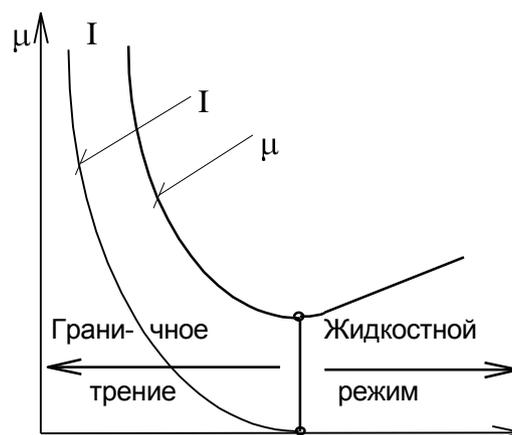
Если величина ΔP значительна ($P > P_c$), то предельные напряжения сдвига равны

$$\tau_{\text{стекл.}} \cong c\Delta P. \quad (1.64)$$

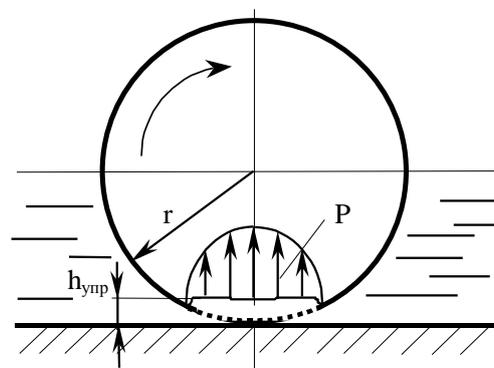
При проектировании узлов трения, имеющих гидродинамические подшипники, целесообразно использовать режим стеклования, обеспечивающий устойчивую работу подшипника, высокую жесткость опор и минимальные потери на трение.

Заключение

В основе современного подхода к пониманию трения лежит идея дискретности контакта трущихся поверхностей. Сегодня она кажется самоочевидной, хотя еще недавно для ее признания требовалось приводить тщательные доказательства.



Р и с. 1.22. Диаграмма Герси-Штрибека



Р и с. 1.23.

Эластогидродинамический эффект

В развитие этой идеи большой вклад внесен российскими трибологами, основные работы которых выполнялись в 50-70-е гг. Особо здесь следует отметить И.В.Крагельского, Н.Б.Демкина, Э.В.Рыжова, Н.М. Михина и других последователей московской школы.

С позиции дискретности контакта анализируются механизмы трения и изнашивания, контактной жесткости, реологические характеристики контакта и выбор их моделей, дается оценка упругих и неупругих реакций, рассматриваются адгезия поверхности и смазки, контактная гидродинамика и др.

В главе также отражена вторая, не менее общая идея, выдвинутая И.В. Крагельским, Б.В. Дерягиным и зарубежными трибологами о двойственной молекулярно-механической природе трения.

Изложены основы гидродинамической теории смазки, поскольку подшипники качения и гидродинамические опоры являются в современных машинах основным средством обеспечения высокой работоспособности узлов.

Физические процессы при трении обусловлены закономерностями взаимодействия твердых тел, при упругой и пластической деформации микронеровностей поверхностей, теплопереносом, адгезией и гидродинамикой смазки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. М.: Машиностроение, 1968. 503 с.
2. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988. 256 с.
3. Джонсон Д. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
4. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
5. Дерягин Б.В., Кротова Н.А. Адгезия. М-Л.: Изд-во АН СССР, 1949.
6. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
7. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 248 с.
8. Основы трибологии: Учебник для технических вузов/Под ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Центр «Наука и техника», 1945.- 778 с.
9. Реология. Теория и приложение/Под ред. Эйриха. М.: Иностран. лит., 1962. 822 с.
10. Чичинадзе А.В., Матвиевский Р.М., Браун Э.Д. Материалы в триботехнике нестационарных процессов. М.: Наука, 1986. 248 с.

Глава 2

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

1.6. Общая характеристика динамических явлений в узлах трения

Узлы трения машин всегда подвергаются динамическим воздействиям. В транспортных машинах вибрации и удары поступают от контакта с дорожным полотном; от работающего двигателя, а также от воздействия самовозбуждающихся колебаний на элементах корпуса, рамы, системы управления и др. Последние являются вторичными по способу возбуждения, но воздействуют на контактирующие поверхности совместно с вибрацией извне.

Трущиеся контакты, как показано в гл. 1, при определенных условиях, сами создают фрикционные колебания релаксационного типа, а для подшипников качения, зубчатых, цепных и ряда других пар трения вибрация и шум являются их неотъемлемым свойством, обусловленным прерывистым контактом зацепления.

Динамические воздействия на трущиеся поверхности вызывают упругую и неупругую деформацию в зоне контакта, что является предметом изучения динамики контактирования. При этом упругие деформации и упругий возврат локализуются на дискретных участках контакта, придают специфику проявлению контактной жесткости. Импульсные воздействия вызывают не только колебания, но и поверхностные волны. Пластическая микродеформация создает тепловые флуктуации, а в совокупности все перечисленные процессы определяют рассеяние (диссипацию) механической энергии колебаний. Ее поглощение происходит в материале деталей и в окружающей среде.

При определенных условиях возникает режим контактного резонанса, который аномально повышает интенсивность пластической деформации и накопление повреждаемости. При пластической деформации микровыступов поверхностные зерна поликристаллических материалов деформируются раньше и интенсивней, чем во внутренних объемах. Это ускоряет диффузионные процессы, перенос вещества, в том числе из глубины в поверхностные слои, а также из внешней среды и контрповерхностей данной пары трения, интенсифицирует структурно-энергетические явления в поверхностных слоях материала, усиливает электрохимические, акустические и другие явления.

Динамическое нагружение поверхностей трения физики справедливо называют механизмом накачки материала точечными и другими дефектами.

Не менее сложным является динамическое воздействие на смазочный слой - третье тело трибосистемы. В смазочном слое при вибрации проявляется его собственная упругость, зависящая от частоты воздействия. Смазочный слой рассеи-

вает механическую энергию как активный демпфер. Динамическое возмущение и температурные флуктуации пробуждают в смазочном слое дополнительное внутреннее трение, что увеличивает вязкие силы и нагрузочную способность смазочного слоя, но при этом ускоряется термомеханическая деструкция смазки.

Процессы разрушения поверхностей и смазки с учетом динамических факторов более подробно рассмотрены в главе «Изнашивание», а в данном случае внимание концентрируется на явлениях, изучаемых механикой твердого тела и теорией колебаний.

1.7. Узел трения как объект моделирования в динамике машин

Вибрация, удары, сложные процессы переноса механических возмущений в узлах и механизмах машин являются объектом изучения научной дисциплины, именуемой «Динамика машин». В России основы этой науки в применении к узлам трения заложены такими учеными, как Н.Н. Давиденков, А.С. Ахматов, Д.М. Толстой, К.В. Фролов, В.А. Кудинов и др.

Рассмотрим некоторые основные понятия и термины динамики машин, необходимые для динамического анализа узлов трения.

Понятие «**узел трения**». В триботехнике принято рассматривать узлы трения как механизмы или составляющие машин, в которых имеет место относительное движение соприкасающихся частей.

Узлами трения являются подшипники скольжения и качения, прямолинейные и цилиндрические направляющие, ползуны, зубчатые, фрикционные механизмы и др.

Понятие «**динамическая модель узла трения**». Под динамической моделью понимают описание механизма (узла трения), отражающее его динамические свойства и связи с помощью совокупности символов, условных обозначений и аналитических приемов с условием, что динамические воздействия на модель вызывают реакцию, идентичную реальной в узлах трения.

В качестве примера рассмотрим узел ползуна и его динамическую модель. Пусть колебания в направляющих ползуна возбуждает сила $P(t)$, приложенная к подвижной части ползуна, как это показано на рис. 2.1. На рис. 2.1,а приведено упрощенное изображение ползуна, перемещающегося в плоских направляющих скольжения, как одного из характерных механизмов машин: 1 - ползун; 2 - направляющие; 3 - массивная станина; 4 - муфта.

На рис. 2.1,б приведена динамическая двухмассовая модель, описывающая нормальные колебания ползуна, где M_1 и M_2 - соответственно масса ползуна и станины; $P(t)$ - возмущающаяся сила (например, создаваемая работой двигателя); K_1 и K_2 - контактная жесткость в соединениях (K_1 - жесткость направляющих, K_2 - жесткость между станиной и основанием); C_1 и C_2 - характеристики демпфирующей способности стыков.

Как известно, в теории колебаний наиболее распространено описание динамики движения масс уравнениями Лагранжа. Классическим примером такого описания является уравнение линейного осциллятора, представляющего собой одно-

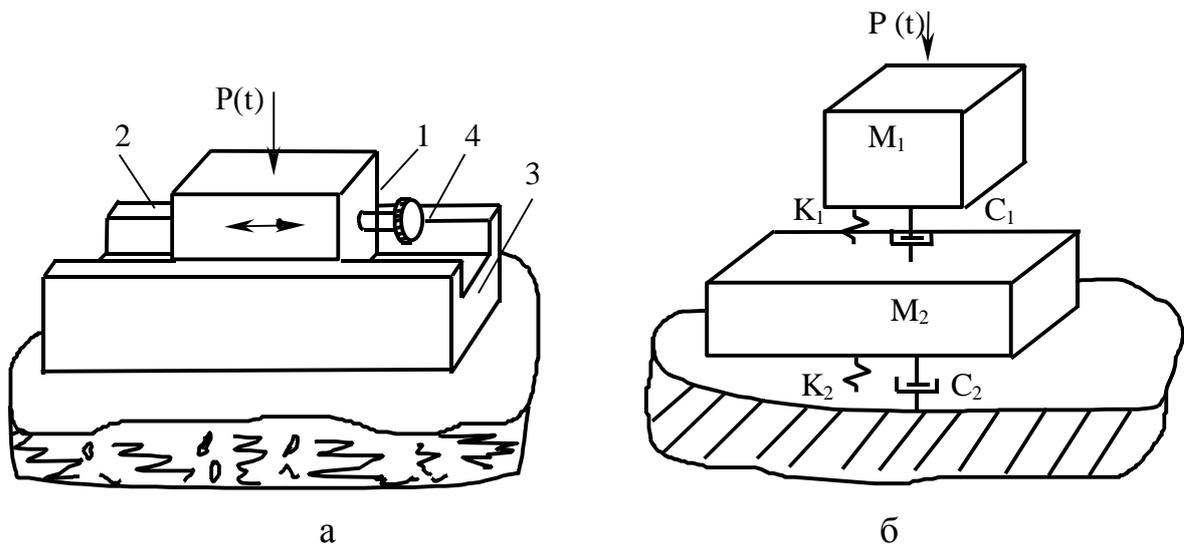


Рис.2.1. Пример построения динамической модели узла трения:
 а - схема механизма;
 б - динамическая модель механизма

массовую модель механической системы (см. рис. 2.2), возбуждаемой гармонической силой $P(t)=P\sin\omega t$ и совершающей упругие колебания с амплитудой $X(t)$.

Колебания осциллятора m , вследствие суперпозиции сил при постоянных значениях K и C описываются уравнением колебаний:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P\sin\omega t, \quad (2.1)$$

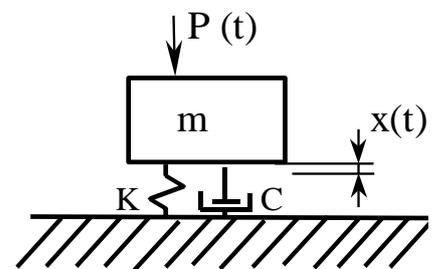
где $m\ddot{x}$ - инерционная сила массы, пропорциональная ускорению \ddot{x} ; $c\dot{x}$ - демпфирующая сила (неупругое сопротивление), пропорциональная скорости колебаний \dot{x} ; kx - упругая сила (пропорциональная перемещению x); $P(t)$ - возмущающая сила, изменяющаяся по закону синуса.

Отметим, что динамические модели могут быть многомассовыми, но тогда возрастает сложность их математического описания.

В примере с ползуном можно учесть что станина не менее чем в 10 раз массивнее ползуна поэтому ее колебаниями по сравнению с колебаниями ползуна можно пренебречь.

Тогда, уравнение (2.1) позволит описать колебания ползуна m_1 , а коэффициенты соответственно будут означать K - контактную жесткость стыка «ползун - станина», а c - коэффициент демпфирования в этом стыке.

Подобным образом моделируют узлы трения, а с целью упрощения описания производят приведение масс.



Р и с. 2.2. Модель линейного осциллятора

Например, кузов и раму автомобиля описывают единой массой, также описывают двигатель (большое число узлов трения), шасси и другие крупные компоненты транспортных средств.

В иных случаях, напротив, требуется детальное описание и расчет динамики узла. Например, топливный насос может быть описан как многомассовая система, в которой каждый плунжер может быть представлен отдельной массой.

1.8. Динамическая характеристика узлов трения

Инерционные свойства узлов трения

Мерой инерциальных свойств динамической системы является характеристика массы ее элементов. Как уже указывалось выше, при динамической схематизации узлов трения допускают целесообразные упрощения - объединяют жестко связанные между собой элементы узла и рассматривают их как единую массу. В аналитической части для этого применяют правила приведения. Например, для двух объединяемых масс m_1 и m_2 находят $M_{\text{прив.}}$ из условия

$$T = \frac{1}{2} M_{\text{прив.}} \cdot V^2, \quad (2.2)$$

где T - кинетическая энергия системы, V - скорость точки, к которой приведена масса.

Характеристика возбуждающих сил в узлах трения

Возбуждающие силы могут иметь непрерывные периодические или импульсные характеристики воздействия на узел трения во времени, единичный или сложный состав спектра возбуждающих сил.

В реальных случаях, наряду с непрерывными периодическими компонентами воздействия (например, оборотные частоты коленчатых валов или роторов двигателей, колебания от дисбаланса вращающихся колес и т.п.), всегда имеется спектр случайных вибраций (например, от дорожного полотна), описание которых простыми непрерывными функциями затруднительно. Наиболее удобным для современных методов расчета является задание амплитудно-частотной характеристики спектра возмущающих сил статистическими методами.

Упругие свойства узлов трения

Общей характеристикой упругих свойств динамических систем является их жесткость понимаемая как отношение действующей силы P к вызываемой ею упругой деформации в стыке Δ :

$$K = \frac{P}{\Delta}. \quad (2.3)$$

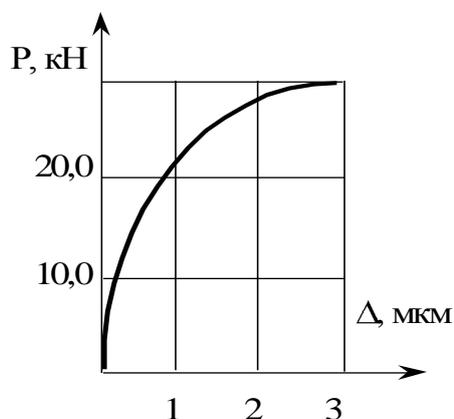
Отметим, что рабочие нагрузки, действующие на узел трения, могут вызывать объемные упругие деформации его деталей, например, прогибы осей, сжатие втулок подшипников и т.п. Но, как правило, объемные деформации деталей узлов трения под нагрузкой малы, по сравнению с деформацией самого контакта. Поэтому при описании динамических процессов в узлах трения, составлении уравнений колебаний обычно учитывается только контактная жесткость. Она выражается также в виде отношения действующей нагрузки к вызываемой ей деформации, как это показано в выражении (2.3).

Как правило, в реальных узлах трения (подшипниках качения и скольжения, плоских направляющих, неподвижных стыках и пр.) характеристика контактной жесткости нелинейна, как это показано на рис. 2.3.

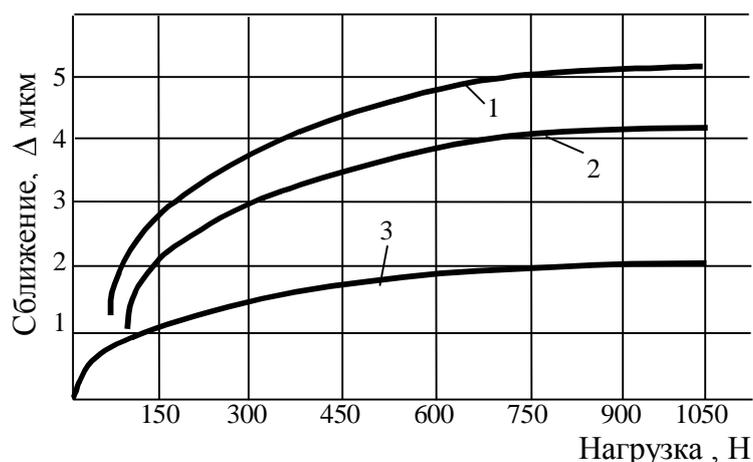
Нелинейную характеристику жесткости удобно описывать степенными функциями, подбирая значения коэффициентов. В примере на рис. 2.3 контактная деформация Δ может быть представлена в виде:

$$\Delta = aP^n. \quad (2.4)$$

Контактная жесткость существенно зависит от вида механической обработки поверхностей, применяемой смазки и других факторов. Примеры нелинейной жесткости приведены на экспериментальных графиках рис. 2.4.



Р и с. 2.3. Пример нелинейной характеристики контактной жесткости

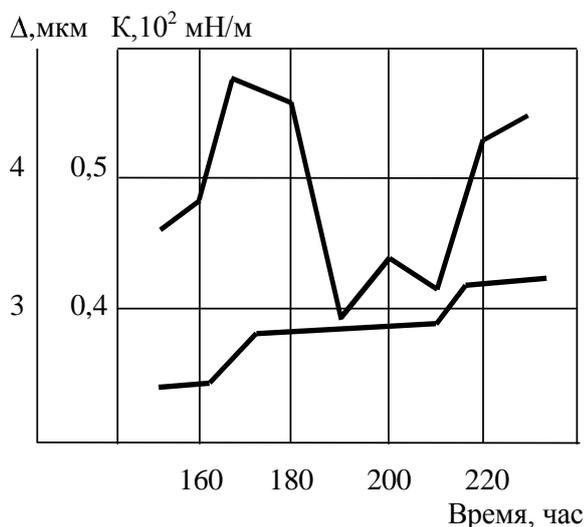


Р и с. 2.4. Примеры характеристик контактной жесткости для «сухого» стыка с номинальной площадью $S=30 \text{ см}^2$:
1 - шлифованные образцы; 2 – шабренные образцы;
3 - упрочненные образцы

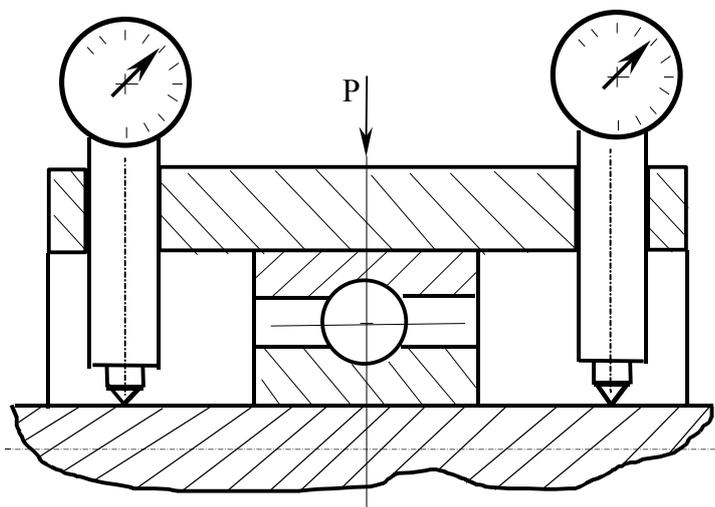
Отметим, что при изнашивании поверхностей трения контактная жесткость нестабильна во времени. По мере изнашивания поверхностей трения изменяется их физическое состояние. После отделения очередной порции частиц износа, что будет подробнее рассмотрено ниже, поверхность становится более гладкой и жесткой. Но по мере накопления повреждаемости она как бы разрыхляется, и жест-

кость снова падает до момента очередного отделения частиц износа. Такие циклы изменения жесткости во времени в одном из узлов трения при форсированном режиме испытаний показаны на рис. 2.5. Цикл изменения контактной жесткости, например в паре «чугун-сталь», составляет примерно 20 часов непрерывной работы. За это время значение жесткости изменяется почти в два раза.

Испытания проводились при удельной нагрузке - 0,25 МПа. Скорость скольжения - 5 м/мин.



Р и с. 2.5. Циклические изменения контактной жесткости по мере течения износа поверхностного слоя



Р и с. 2.6. Устройство для измерения радиальной контактной жесткости шарикового подшипника

Оценка контактной жесткости может производиться экспериментально на реальных узлах трения при наличии специальных приспособлений для приложения нагрузки к испытываемому узлу и измерения контактной деформации.

Более доступна оценка контактной жесткости на моделях пар или специальных стендах. Схема модельного устройства для оценки контактной жесткости радиальных подшипников приведена на рис. 2.6.

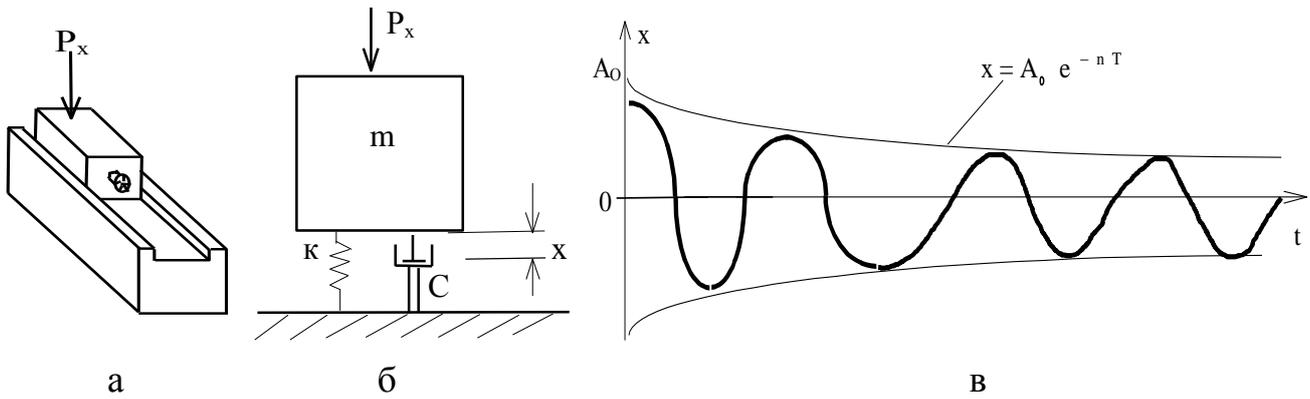
Диссипативные свойства узлов трения

При описании диссипативных свойств любой динамической системы применяют термины демпфирование, неупругое сопротивление, и др.

Отметим, что это термины-синонимы, применяемые в механике для описания одного явления - затухания колебаний вследствие необратимого рассеяния энергии динамической системой машин или механизмов.

Обсудим эту характеристику путем общепринятого подхода в теории колебаний.

Представим, как и ранее, узел трения в виде одномассовой модели, рис. 2.7.



Р и с. 2.7. Иллюстрация методики оценки логарифмического декремента колебаний δ :
 а - схема механизма; б - модель механизма;
 в - виброграмма затухающих колебаний в стыке

В рассматриваемой одномассовой системе затухающие колебания ползуна, вызванные единичным импульсом P_x , описывают уравнением свободных колебаний

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0 . \quad (2.5)$$

Колебания в этой системе начинаются после выведения ее из положения равновесия путем задания начальных условий.

Известно, что общее решение подобных уравнений имеет вид:

$$X = A_0 e^{-nT} \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.6)$$

где A_0 - начальная амплитуда свободных колебаний; φ - начальная фаза; $A(t) = A_0 e^{-nT}$ - экспоненциальная функция, характеризующая убывание амплитуды с течением времени; $T = \frac{2\pi}{\omega}$ - период колебаний, ω - круговая частота; $n = c/2m$ - коэффициент затухания.

Диссипативный коэффициент C для уравнения (2.5) определяют по экспериментальным виброграммам затухания с помощью логарифмического декремента колебаний - δ , (см. рис. 2.7,в):

$$\delta = \ln \frac{A_t}{A_{t+1}} = nT, \quad (2.7)$$

где A_t и A_{t+1} - по рис. 2.7,в амплитуды затухающих колебаний в момент времени, отличающийся на период колебания.

Эта характеристика вводится в дифференциальное уравнение (2.5) следующим образом.

При решении все коэффициенты уравнения (2.5) (m , c и k) делят на m . В результате уравнение (2.5) получает вид

$$\ddot{x} + 2n \dot{x} + ax = 0, \quad (2.8)$$

где $\frac{c}{m} = 2n$; $\frac{k}{m} = \omega_0^2$; ω_0 - собственная частота системы.

Учитывая, что частота колебаний $f=1/T$ получаем выражение коэффициента демпфирования:

$$C = 2m \cdot n = 2mf\delta . \quad (2.9)$$

Такова структура коэффициента демпфирования в линейной системе, характеризующего диссипацию энергии колебаний.

В реальных узлах трения явление рассеяния усложняется - проявляются нелинейная зависимость логарифмического декремента колебаний от их скорости $\delta = f(\dot{x})$ и другие сложные зависимости от температуры, давления, свойств и состояния материала деталей и смазки.

Зависимость характеристики диссипации энергии от скорости определяют по методике, подобной упомянутой выше: снимая получают виброграмму затухающих колебаний (см. рис. 2.7,в), а затем дифференцированием - виброграмму скорости колебаний. По виброграмме находят логарифм отношения амплитуды виброскорости соседних периодов колебаний:

$$\bar{\delta}_* = \ln \frac{\dot{x}}{\dot{x}_{n+1}} . \quad (2.10)$$

Такая оценка характеристики диссипативности системы более точна по физическому смыслу явления, заключающегося в том, что рассеяние в системе пропорционально скорости затухающих колебаний.

Наибольшее влияние на суммарную диссипативность любого стыка оказывают свойства смазочного слоя и контактное давление. Несмотря на малую толщину, присутствие смазочного слоя увеличивает значение декремента колебаний по сравнению с «сухим стыком» в 2-3 раза. Также существенное отличие имеет демпфирующая способность смазочного слоя в зависимости от его собственной структуры и свойств смазочного материала.

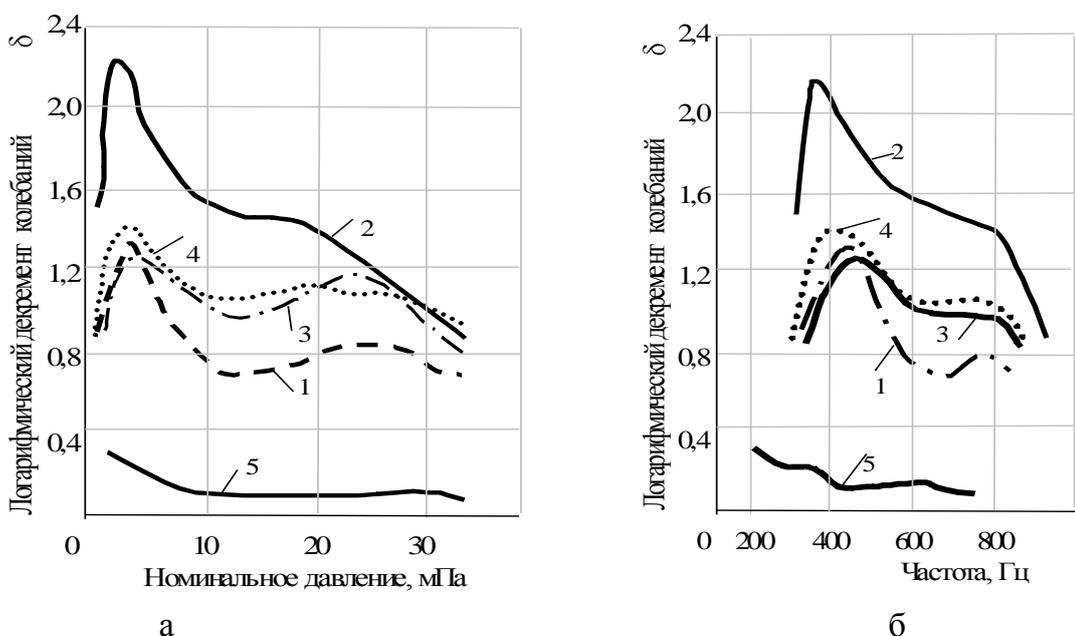
Иллюстрация масштабности воздействия этих факторов приведена на рис. 2.8.

Высокая демпфирующая способность слоя смазки под номером 2 не является случайной.

В результате исследований было установлено, что существуют органические, минеральные и синтетические структуры, обладающие известным в физике свойством поворотной изомерии.

При пульсации давления (в динамически нагруженном стыке) за каждый период упругих колебаний происходит необратимый процесс перехода молекул из одного поворотного-изомерного состояния в другое, вследствие чего происходит интенсивная диссипация энергии. Внутреннее трение такого рода называют объемной вязкостью.

Если в обычные смазочные жидкости добавить вещества с указанным свойством, то наблюдается высокий эффект диссипации энергии смазочным слоем (см. рис. 2.8, кривая 2).



Р и с. 2.8. Результаты исследования зависимости логарифмического декремента колебания:

а - от величины номинального давления в стыке; б - от частоты возмущающей силы
 1 - ИНСП - 110; 2 - опытное масло; 3 - Топпа-72; 4 - Vactra; 5 - несмазанный стык

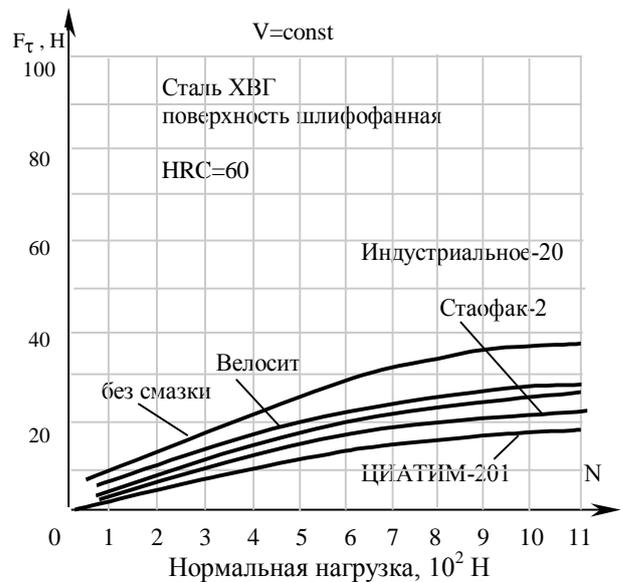
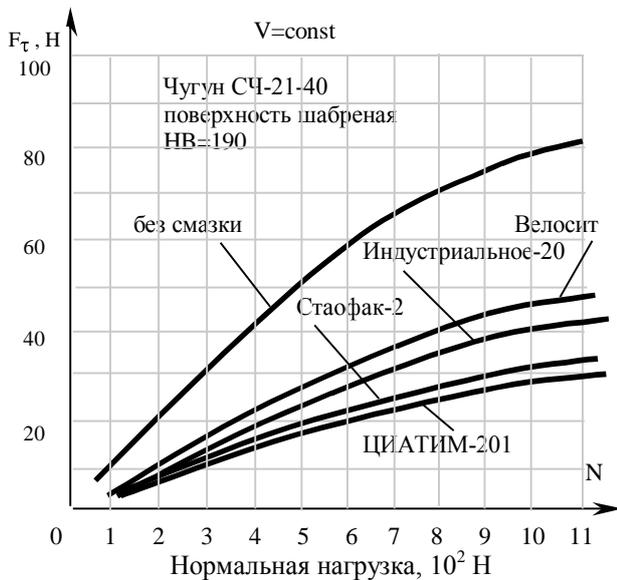
К числу веществ, вызывающих повышение диссипативности смазки, относятся циклогексанол, моно, ди- и триметил замещенные производные циклогексана, ацетат, алкил (C₁ - C₂)- лактат, ферроцены и др.

Механизм рассеяния энергии при тангенциальных колебаниях

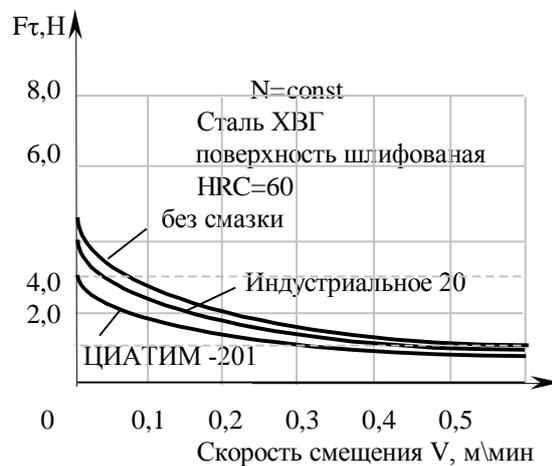
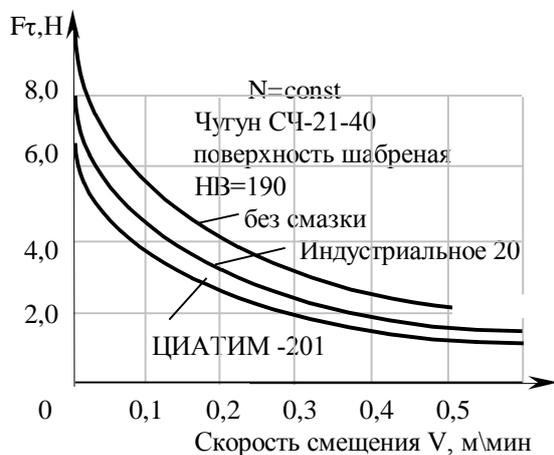
Как уже отмечалось, контакт реальных шероховатых поверхностей обладает касательной упругостью, что создает большие трудности, например, при необходимости получения малых перемещений. Пример такой ситуации - перемещение суппортов координатно-расточных станков или координатно-измерительных машин на малые расстояния порядка 10⁻³ мм. В силу касательной упругости в контакте вначале наблюдается упругое сопротивление участка, как это показано на рис. 2.9. После достижения некоторой величины перемещения, обычно около 0,001 мм, происходит прыжок и начинается перемещение путем трения скольжения. Это явление, как уже указывалось, называют предварительным смещением.

Как видно из приведенных экспериментальных данных, на силу сопротивления при касательном смещении оказывают существенное влияние смазка, вид обработки поверхностей и их состояние.

Для преодоления скачков при малых скоростях движения, вызываемых предварительным смещением, создают специальные «антискачковые» смазки. Эффект уменьшения силы и величины скачка достигается применением поверхностно-активных добавок, предотвращающих контакт неровностей металлических поверхностей и переносящих трение вовнутрь смазочного слоя.



а



б

Р и с. 2.9. Характеристики предварительного смещения:

а - характер зависимости предельного значения силы предварительного смещения от нормальной нагрузки; б - характер зависимости предельного значения силы предварительного смещения от скорости движения

1.9. Общая схема оценки величины динамического нагружения в узлах трения

Динамическая компонента контактных напряжений в современных машинах соизмерима по значению, а иногда превышает постоянные составляющие проектных нагрузок.

В общем случае схема динамического нагружения контактирующих поверхностей может быть представлена, как это изображено на рис. 2.10.

При расчетах деталей машин в первом приближении достаточно динамическое приращение контактных нагрузок оценивать с помощью динамических коэффициентов. Так, например, динамический коэффициент нагрузки для зубчатых зацеплений достигает в тяжелых случаях значений $1,2 \div 1,4$.

Более корректный подход к оценке динамических напряжений требует рассмотрения целой группы вопросов.

1. По устройству узла, его рабочему процессу, размерам и массе элементов определяют номинальные значения контактных напряжений.

2. Анализируют деформацию узла под нагрузкой и определяют площадь пятен контакта. Рассчитывают также эпюру контактных напряжений в каждом соединении.

3. Производят динамическую схематизацию узла трения, его математическое описание и рассчитывают массовые (инерционные) силы в зоне контакта, которые формируют контактные напряжения. В линейной постановке расчета диапазон изменения инерционного усилия пропорционален массе, амплитуде и квадрату частоты ($\Delta P_{\text{дин}} \cong 2m A \omega$).

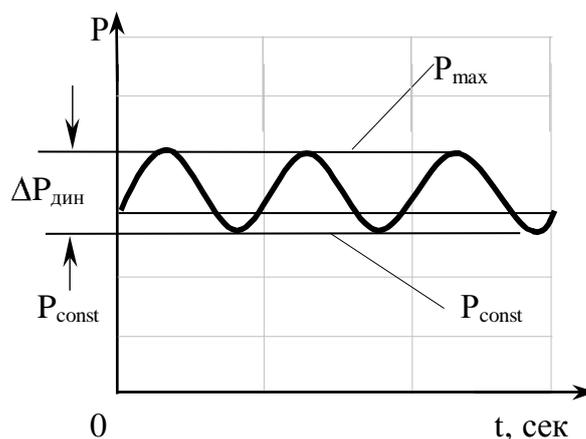
4. Поскольку имеется составляющая от волн напряжений (наиболее существенны волны растяжения-сжатия), то она также должна быть учтена. Волновые напряжения в тяжелых условиях работы (например, опоры ходовой части транспортных машин) могут составлять до 30 % суммарной нагрузки.

При наличии опытного образца изделия или его узлов расчетные оценки проверяются экспериментально.

Заключение

Рассмотренные в данной главе вопросы имеют важное значение, поскольку позволяют управлять рядом важнейших эксплуатационных характеристик машин, начиная с этапа проектирования узлов трения путем расчетно-аналитической оценки динамических характеристик узла трения: собственных частот стыков, что необходимо для избежания резонанса как в узле трения, так и в машине в целом; величины инерционных (массовых) сил и волн напряжений, участвующих в формировании суммарных контактных напряжений, и др.

При дальнейшей работе над изделием на основании динамического анализа разрабатывают мероприятия, которые могут быть использованы для уменьшения динамических нагрузок в узлах трения и снижения динамичности узлов трения в целом. Многие недостатки отечественных машин, их низкий ресурс связаны с недооценкой динамики при расчете, проектировании и эксплуатации.



Р и с. 2.10. Характерная схема сочетания постоянной и переменной составляющих контактной нагрузки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артоболовский И.И., Генкин М.О., Сергеев В.И. Акустическая динамика машин и конструкций. М.: Наука, 1973. 360 с.
2. Геккер Ф.Р.. Динамика машин, работающих без смазочных материалов в узлах трения. М.: Машиностроение, 1983. 280 с.
3. Громаковский Д.Г., Михайлов И.Г., Манучаров Ю.С., и др. О механизме диссипации упругой энергии смазочных слоев//Докл. АН СССР. 1982. № 2. 266 с.
4. Ишлинский А.Ю.. Механика. Идеи, задачи, приложения. М.: Наука, 1985. 624 с.
5. Кудинов В.А.. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
6. Максак В.И.. Предварительное смещение и жесткость металлического контакта. М.: Наука, 1975. 59 с.
7. Писаренко Г.С. Колебания механических систем с учетом несовершенной упругости материала. Киев: Наукова думка, 1967. 359 с.
8. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т./Под ред. В.Н. Челомея. М.: Машиностроение, 1978.

Глава 3

СТРОЕНИЕ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРУЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ

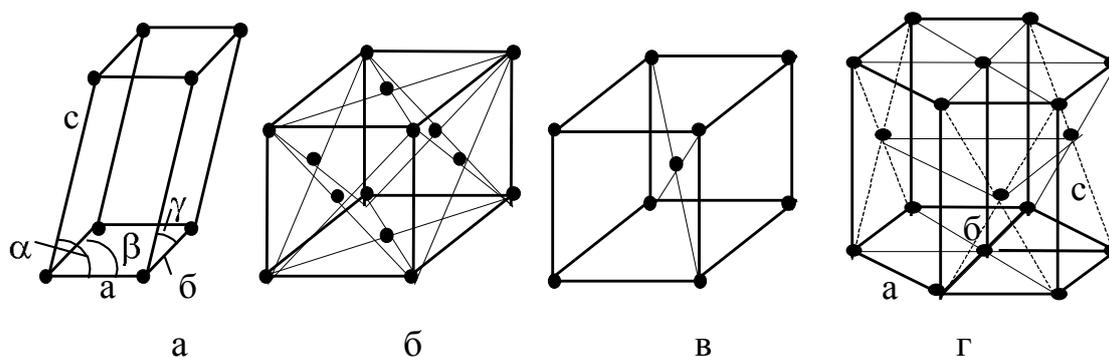
Явления, имеющие место при трении и изнашивании, во многом определяются свойствами материалов, из которых изготовлены детали машин, а также состоянием их поверхностных слоев. Настоящая глава преследует цель подготовить читателя к изучению процессов разрушения поверхностей трением, которые будут изложены в следующей главе, поскольку для их понимания необходимо владеть минимальной совокупностью знаний из термодинамики, физики твердого тела и физического металловедения.

Считается, что при трении нагруженные участки поверхностей получают энергетические воздействия до 100 эВ/атом·с, т.е. на уровне разрушения атомных связей. Однако в реальной действительности доля латентной (запасенной) энергии, создающей разрушение, снижается на 4 - 5 порядков. Это снижение разрушающей энергии, ее рассеяние обусловлены диссипативными свойствами поверхностных структур. Следуя терминологии физического металловедения, в трибологии их принято называть диссипативными структурами. Современные подходы к пониманию происходящих явлений связывают эти процессы с самоорганизацией диссипативных структур, изучаемых синергетикой и термодинамикой неравновесных процессов.

4.5. Строение, структура и дефекты материалов пар трения

Конструкционные материалы, применяемые в узлах трения, делятся на кристаллические и аморфные. С физической точки зрения твердыми телами считаются только кристаллы. Их атомы располагаются в узлах регулярной пространственной структуры - кристаллической решетки, структурной единицей которой является *элементарная ячейка*. Примеры ряда структурных схем кристаллов приведены на рис. 3.1.

В общем случае элементарная ячейка имеет вид косоугольного параллелепипеда (рис. 3.1,а), характеризуемого значениями сторон a , b , c и углов α , β , γ . По соотношению сторон и углов выделяют 7 кристаллических систем. Наиболее распространенными являются решетки кубические (рис.3.1,б,в) и гексагональные (рис.3.1,г). Если в центрах граней куба располагаются дополнительные атомы, то решетка называется гранецентрированной (ГЦК), если атом внедряется в центр куба - решетка объемноцентрированная (ОЦК). Гексагональная плотноупакован-



Р и с. 3.1. Схемы элементарных ячеек

ная решетка имеет ячейку с основанием в виде правильного шестиугольника. Кубические решетки типа ГЦК и ОЦК характерны для сталей. Между атомами в решетке возможны связи 3-х типов: *ионная, ковалентная, металлическая*. В первом случае в узлах находятся положительные и отрицательные ионы, во втором - нейтральные атомы, валентные электроны которых образуют пары, движущиеся в поле соседних ядер. Связь имеет квантово-механическую природу. Металлическая связь возникает между атомами металлов. Валентные электроны в этом случае обобществляются, покидают свои атомы и совершают хаотическое тепловое движение в общем поле атомных остатков, находящихся в узлах решетки (свободные электроны).

Между молекулами в молекулярных решетках действуют *силы Ван-дер-Ваальса*, энергия которых примерно на 2 порядка ниже, чем у атомных связей. Особым видом молекулярного взаимодействия является *водородная связь*. Слабоэкранированное одним электроном ядро атома водорода, участвующего в ковалентной связи, может притягиваться к сильноэлектроотрицательным атомам (кислород, фтор) и образовывать с ними вторую связь. Водородная связь прочнее других межмолекулярных. Она характерна для взаимодействия молекул углеводородов, в частности полимеров, с кислородом окислов металлов, является важнейшей формой связи между молекулами воды в жидком состоянии и в виде льда. В таблице 3.1. представлены величины энергии перечисленных видов связей и указаны характерные свойства кристаллов.

Потенциальная энергия взаимодействия между парой изолированных атомов E выражается формулой:

$$E = \frac{A}{r^m} - \frac{B}{r^n}, \quad (3.1)$$

где A , B , m , n - коэффициенты. Первый член уравнения характеризует энергию сил отталкивания, второй - сил притяжения. Поскольку сила взаимодействия выражается в виде

$$F = -\frac{dE_n}{dr}, \quad (3.2)$$

то

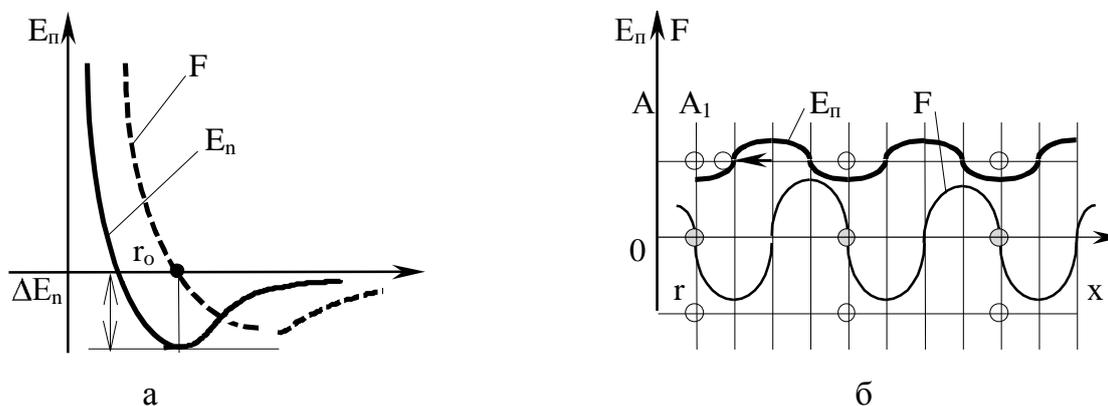
Энергия связи и некоторые свойства кристаллов

Тип связи	Примеры кристаллов	Энергия связи, кДж/моль	Некоторые свойства кристаллов
Ионная	NaCl LiF MgO	~ 1000	Малая электропроводность при низких и хорошая ионная проводимость при высоких температурах. Высокие прочность, твердость и температура плавления, хрупкое разрушение
Ковалентная	C(алмаз), Si, Ge, TiN, WC, SiC	~ 700	Высокая твердость, низкая электропроводность при малых температурах, хрупкость. Некоторые материалы являются полупроводниками
Металлическая	Fe, Cu, Al, Ag, Na	~ 400	Высокая электропроводность и пластичность
Молекулярная	Молекулы в полимерах Ar, CH ₄	~ 10	Низкая температура плавления, сильная сжимаемость, пластичность, ползучесть, вязкая упругость
Водородная	H ₂ O, HF	~ 50	Склонность к образованию разветвленных многомолекулярных структур

$$F = \frac{mA}{r^{m+1}} - \frac{bn}{r^{n+1}}. \quad (3.3)$$

На рис. 3.2,а показаны функции $E_p(r)$, $F(r)$. Имеется в виду, что один атом помещен в начале отсчета, второй можно перемещать вдоль оси r . При этом r_0 - положение устойчивого равновесия, в котором находятся атомы при $T=0$ К. Если вещество нагрето, то второй атом будет колебаться относительно первого, и чем выше температура, тем больше размах колебаний. Если же кинетическая энергия превысит высоту потенциального барьера на ΔE_p , то данный атом может оторваться от первого и произойдет диссоциация. Пунктиром показан график зависимости силы от расстояния между атомами. При $r = r_0$ сила взаимодействия равна нулю. Левая крутая ветвь характеризует силы отталкивания, а правая пологая - силы притяжения. Часто r_0 принимают за условный диаметр атома, хотя истинное среднее расстояние между центрами атомов, как следует из сказанного, увеличивается с ростом температуры из-за асимметрии потенциальной кривой, что и является причиной теплового расширения.

Когда атомы объединяются в кристалл, то потенциальные кривые накладываются и у расположившихся в цепочку атомов (рис. 3.2,б) результирующая кривая имеет периодический характер. Периодический характер имеет и зависимость силы от координаты, график которой изображен тонкой линией. Исходя из этого, напряжение, вызывающее сдвиг одной части кристалла относительно другой вдоль плоскости параллельной оси X , так же, как и сила, препятствующая смещению атома A в положение A_1 , может быть представлено в виде



Р и с. 3.2. Силовые и энергетические характеристики межатомного взаимодействия

$$\tau = K \sin \frac{2\pi x}{b} . \quad (3.4)$$

С другой стороны, по закону Гука $\tau = GX/h$. Здесь G - модуль сдвига, b и h - параметры решетки. Поскольку сдвиговые деформации начинаются при $X \ll b$ (в алюминии при $X/b \cong 0,002$), то $\sin 2\pi x/b \cong 2\pi x/b$.

Тогда $K \cdot 2\pi x / \cong Gx/h$, следовательно, $K \leq Gb/2\pi b$, а сдвиговое напряжение

$$\tau = \frac{Gb}{2\pi h} \sin \frac{2\pi x}{b} . \quad (3.5)$$

Максимального значения сила сопротивления достигает при сдвиге, равном $b/4$ (рис. 3.2,б), поэтому

$$\tau_{\max} = \frac{Gb}{2\pi h} \cdot \frac{2\pi}{b} \cdot \frac{b}{4} . \quad (3.6)$$

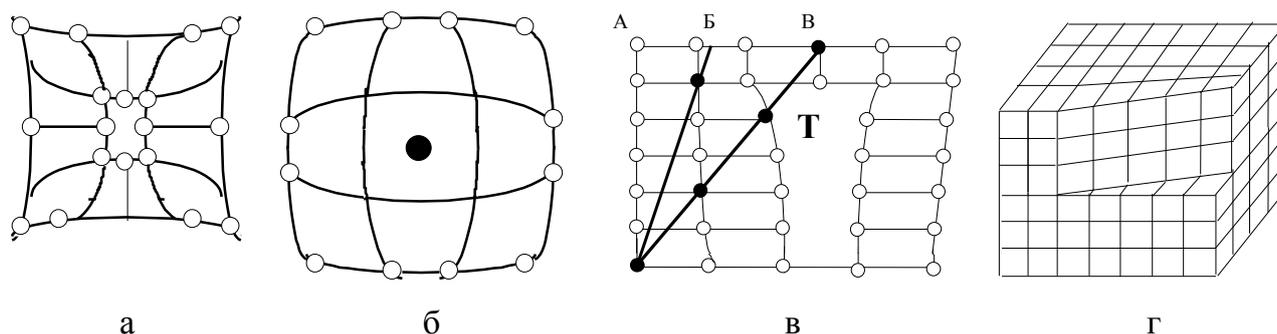
Считая $h \cong b$, получаем, что **теоретическое значение сопротивления сдвигу** $\tau_{\max} \cong G/4$. Это весьма большая величина. В частности, для стали $G \cong 80$ ГПа, следовательно, $\tau_{\max} \cong 20$ ГПа. В действительности сопротивление сдвигу конструкционной стали, по крайней мере, на 2 порядка ниже.

Причиной столь большого расхождения между теоретической и истинной прочностью являются дефекты кристаллической решетки. Из-за дефектов сдвиг происходит не одновременно по всей атомной плоскости, а скольжение начинается на одном или нескольких участках, а затем распространяется по всей плоскости с конечной скоростью, как это происходит при разрыве бумаги, ткани. Наименьшее сопротивление сдвигу наблюдается при скольжении вдоль наиболее плотно заселенных атомами плоскостей.

Дефекты кристаллов делят на нульмерные (точечные), одномерные и двумерные. К точечным относятся энергетические, электронные и атомные. Наиболее распространены энергетические дефекты - фононы - кванты волн растяжения-сжатия и сдвига (звуковые волны). Тепло в кристалле распространяется также в виде механических волн со звуковой скоростью. В квантовой механике распространение звуковых волн, как и электромагнитных, рассматривается как движение

частиц - фононов. Энергия фонона, как и фотона, по формуле Планка равна $h\nu$. К электронным дефектам относятся избыточные электроны, дырки, экситоны. Последние представляют собой пару электрон-дырка, связанную кулоновскими силами.

Основные виды атомных дефектов включают вакансии (рис. 3.3,а), атомы в межузлиях (рис. 3.3,б), чужеродные атомы в узлах. Расстояния между атомами в разных направлениях решетки (рис. 3.3,в) различны (АА, АБ, АВ). Поскольку от межатомного расстояния зависят физические свойства кристаллов: прочность, электропроводность, показатель преломления и др., то идеальные кристаллы являются анизотропными средами (в разных направлениях различные свойства).



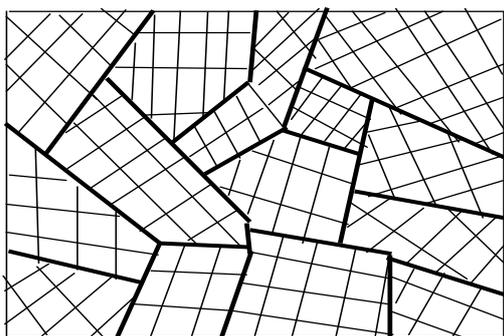
Р и с. 3.3. Дефекты решетки

Анизотропия свойств характерна для идеальной кристаллической решетки - монокристалла. Монокристаллы выращиваются при строго контролируемых температуре и давлении из тщательно очищенного от примесей материала. Их прочность близка к идеальной. Если при отливке изделия такие меры не соблюдаются, то кристаллизация начинается одновременно на множествах центров, которыми являются примесные атомы и другие дефекты. В результате возникает множество произвольно ориентированных монокристаллов с размерами порядка десятков микрометров (рис. 3.4). В то время, как каждый кристаллит обладает анизотропией, твердое тело, состоящее из многих тысяч кристаллов, в среднем однородно, практически изотропно и называется поликристаллом. Обычные конструкционные материалы являются поликристаллами.

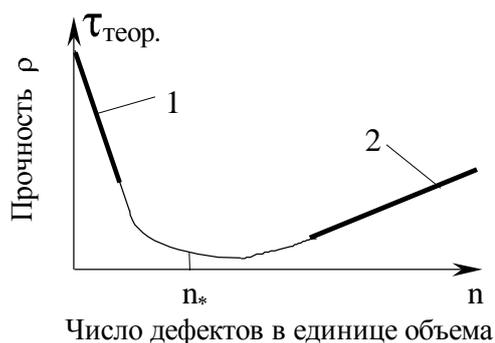
Одномерные дефекты - *дислокации* - играют огромную роль в поведении кристаллов при деформации. Простейшая линейная дислокация представляет собой отсутствующий ряд атомов (см. рис. 3.3,в). Более сложной является винтовая дислокация (рис. 3.3,г), которая возникает в результате поворота одной части кристалла относительно другой. Пластическая деформация кристаллов осуществляется при сдвиговых напряжениях, во много раз меньших, чем теоретические, благодаря движению дислокаций, которое начинается при сравнительно небольшой относительной деформации порядка 10^{-4} - 10^{-3} . Когда дислокация проходит через весь кристалл, одна часть последнего смещается относительно другой на величину межатомного расстояния. Учитывая то, что плотность дислокаций велика (составляет в начале сдвига $\sim 10^6$ - 10^8 см $^{-3}$), то сдвиг приводит к однородному скольжению множества блоков кристалла относительно друг друга с выходом

дислокаций и образованием ступенек на границах тела. Подвижность дислокаций, а следовательно скорость пластической деформации, экспоненциально повышаются с ростом температуры.

На рис. 3.5 показана зависимость прочности от плотности дефектов ρ . Сначала рост числа дефектов (дислокаций) приводит к падению прочности. После достижения минимума прочность нарастает. В этом случае проявляется взаимодействие дислокаций друг с другом и другими дефектами, приводящее к затормаживанию движения дислокаций. Поэтому существуют *два способа упрочнения материалов*: снижение числа дефектов, тогда прочность стремится к теоретической (участок 1 на кривой прочности), либо увеличение плотности дефектов (участок 2). Оба пути реализованы в промышленности. В строго контролируемых условиях получают высокопрочные волокна (например из бора), близкие по строению к бездефектным монокристаллам. На основе этих волокон изготавливают металлокомпозиционные материалы с огромной прочностью на разрыв. Из таких легких и прочных материалов начато изготовление кузовов гоночных автомобилей. Другим примером получения изделий из металлов, содержащих наименьшее число дефектов, является технология изготовления лопаток турбин турбореактивных двигателей. В настоящее время лопатку выращивают как монокристалл в специальных формах при строго контролируемых условиях.



Р и с. 3.4. Схема поликристалла



Р и с. 3.5. Кривая прочности

Второй путь заключается в насыщении кристалла дефектами за счет закалки, легирования или механического наклепа. Легирование приводит к появлению в решетке инородных атомов. Закалка вызывает измельчение зерен поликристалла, причем границы зерен являются двумерными дефектами. На них рассеиваются дислокации. Деформационное упрочнение - наклеп приводит к образованию огромного количества новых дислокаций, которые препятствуют их взаимному перемещению.

Аморфные вещества, в отличие от кристаллических, имеют ближний порядок в расположении молекул, который становится хаотическим при удалении от данной молекулы на несколько диаметров. У таких веществ отсутствует точка плавления. Они изотропны. Течение, как и у жидкостей, происходит при любой нагрузке и резко интенсифицируется с повышением температуры, поэтому они не обладают пределом текучести. Напряжения и деформации являются функциями

нагрузки, времени и температуры. К таким веществам относятся многие *полимеры*. Макромолекулы полимеров имеют цепь из сотен и тысяч атомов углерода, к которой боковыми связями присоединены группы OH, COOH, NH₂, атомы водорода, хлора, фтора. В молекулы могут входить бензольные кольца и другие сочетания атомов. Между макромолекулами действуют силы Ван-дер-Ваальса. В качестве конструкционных материалов используются термопластичные и терморективные полимеры. К термопластичным относятся полиэтилен, винипласт, капрон, нейлон и др. Они размягчаются под действием температуры. В них, наряду с аморфными, имеются и кристаллические области. Примером практически полностью кристаллического полимера является фторопласт - уникальный химически инертный теплостойкий материал с чрезвычайно низким коэффициентом трения.

Терморективные полимеры имеют пространственную сетчатую структуру. Макромолекулы соединяются поперечными ковалентными связями. К ним относятся пластмассы на основе фенол-формальдегидных, эпоксидных и других смол. Такие пластики термостойки, сохраняют прочность до температуры 300÷400 °С.

Особую группу составляют эластомеры, обладающие способностью к большим, порядка сотен процентов относительным упругим деформациям (резины, полиуретаны). Большие деформации связаны с особой формой макромолекул, скрученных в клубки и распрямляющихся при растяжении. За счет введения различных наполнителей из полимеров создают композиции, обладающие заданным комплексом физико-механических и химических свойств.

4.6. Физические свойства поверхностных слоев

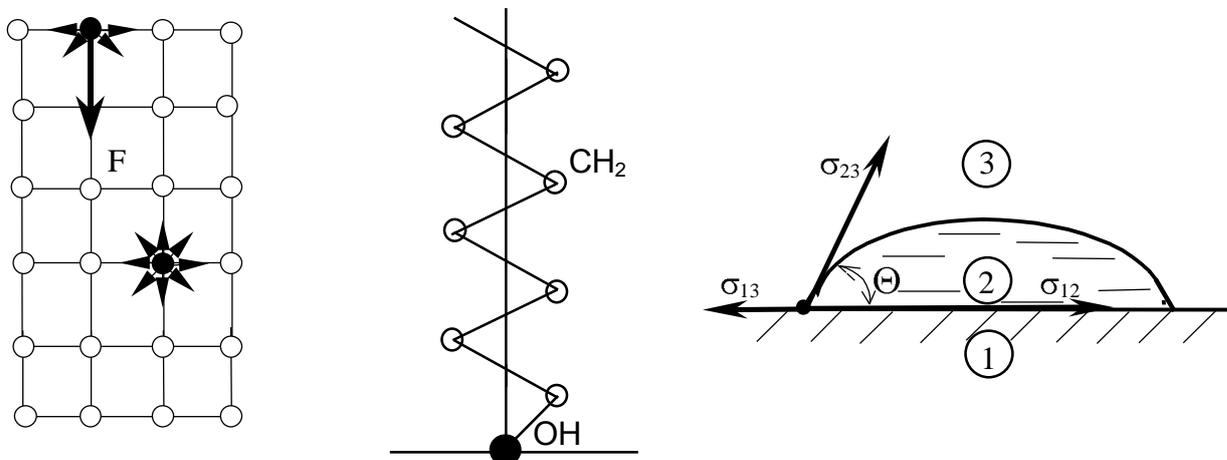
Атомы и другие частицы, находящиеся внутри тела, взаимодействуют при наиболее плотной укладке с 12 соседними (рис. 3.6). Результирующая всех сил взаимодействия стремится к нулю. Частица, находящаяся на поверхности, взаимодействует с 6 соседними. Равнодействующая сил притяжения со стороны соседей F направлена внутрь тела. Иначе говоря, F действует на граничную молекулу. Поскольку энергия сил притяжения отрицательна, то поверхностная частица обладает энергией, избыточной по сравнению с находящимися внутри (*поверхностной энергией*). Избыточная энергия характеризует способность к межмолекулярному притяжению поверхностей, которое называют *адгезией*. Адгезия проявляется в прилипании. Притяжение между слоями атомов внутри тела называют *когезией*.

Наличие нескомпенсированных связей у граничных частиц приводит к оседанию на поверхности молекул окружающей среды, что снижает запас поверхностной энергии. Процесс поглощения поверхностью молекул называется *адсорбцией*. В результате уменьшения запаса поверхностной энергии выделяется теплота адсорбции. Процесс, обратный адсорбции, называется десорбцией. Различают адсорбцию физическую и химическую. *Физическая адсорбция* связана с притяжением инородных молекул за счет сил Ван-дер-Ваальса. *Хемосорбция* вызвана действием валентных связей. Поверхность в разных точках имеет разную поверхностную энергию. Микродефекты обладают повышенной адсорбционной активно-

стью. За счет физической адсорбции на поверхности молекулы газов и воды оседают в первую очередь на активных участках - центрах адсорбции. Сорбированные молекулы вступают в химическую реакцию с материалом. Так протекает окисление поверхностей, вызывающее коррозию. Образуется *окисная пленка*. Сорбированная влага и температура стимулируют процесс окисления. Рост окисной пленки сначала происходит быстро, затем замедляется. Пленки различают по толщине: тонкие (толщина до 40 нм), средние (до 500 нм), толстые - видимые (толщиной более 500 нм). Окислы бывают мягкими и рыхлыми, например, у меди, железа и его сплавов (ржавчина). Твердые и сплошные пленки образуются на алюминии, благородных металлах. Свойства окисных пленок обычно существенно отличаются от свойств материала основы. Наиболее важными являются коэффициент теплового расширения, хрупкость, соотношение адгезионной и когезионной прочности. Из-за различия в свойствах пленки могут растрескиваться и отслаиваться, что существенно влияет на изнашивание при трении.

Особое значение имеет физическая адсорбция молекул *поверхностно-активных веществ* (ПАВ). К ним относятся, в частности, органические вещества, молекулы которых имеют полярные группы (ОН, СООН, NH₂) и неполярные - CH₂ (рис. 3.7). Молекулы ПАВ активными группами сорбируются на активных центрах поверхности, образуя молекулярный ворс, который разделяет пару контактирующих поверхностей и существенно снижает трение (см. гл. «Смазочные материалы»).

ПАВ, адсорбированные на поверхности твердого тела, способны изменять характер взаимодействия с жидкостью (*смачивание*). В зависимости от того, как ориентируются молекулы ПАВ по отношению к твердой поверхности, последняя может хорошо смачиваться (гидрофильная) или плохо (гидрофобная поверхность). Так, если молекулярный ворс направлен полярными группами к поверхности, а противоположные концы являются неполярными, то смачивание хорошее, если ориентация молекул противоположная - смачивание плохое. Оценка *гидрофильности* проводится по величине угла смачивания Θ (рис. 3.8). При смачивании $0 \leq \Theta < \pi/2$, при несмачивании $\pi/2 < \Theta \leq \pi$.



Р и с. 3.6. Атомы
в объеме и на границе

Р и с. 3.7. Молекула
ПАВ

Р и с. 3.8. Силы натяжения

Поскольку система стремится сократить запас поверхностной энергии, то тело пытается уменьшить площадь поверхности. Капля жидкости принимает сферическую форму, так как сфера имеет наименьшее отношение площади поверхности к объему. Поэтому поверхность находится в растянутом состоянии, и если из нее выделить элемент, то действие оставшейся части на элемент можно заменить равномерно распределенными по контуру силами натяжения.

Мерой избыточной поверхностной энергии является *коэффициент поверхностного натяжения* σ , равный избыточной энергии в расчете на единицу площади поверхности или силе натяжения, действующей на единицу длины контура элемента поверхности. На рис. 3.8. показаны силы натяжения на границах раздела фаз: σ_{12} - твердое тело – жидкость; σ_{23} - жидкость-газ; σ_{13} - твердое тело-газ. Поскольку система находится в равновесии, сумма сил равна нулю, а $\cos\theta = \frac{\sigma_{12} - \sigma_{13}}{\sigma_{23}}$. За счет сил натяжения, жидкость в капиллярах образует мениски (рис. 3.9), под которыми возникает давление, рассчитываемое по формуле Лапласа, направленное к центру кривизны:

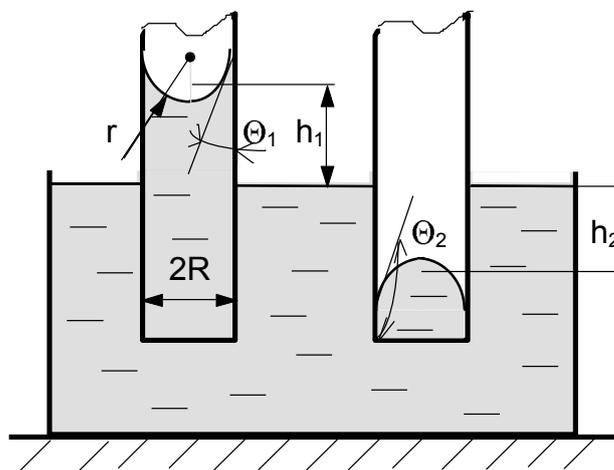
$$P = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \quad (3.7)$$

Под действием этого давления наблюдается *капиллярный эффект*, заключающийся в подъеме либо опускании уровня жидкости в капилляре на высоту

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{R\rho g}, \quad (3.8)$$

где ρ - плотность жидкости; g - ускорение свободного падения. Капиллярный эффект имеет большое значение для пористых тел. Он используется для подачи масла в зону трения в подшипниках с пористыми втулками.

Адсорбированные молекулы ПАВ, понижая поверхностное натяжение, уменьшают сопротивление пластической деформации поверхностного слоя, пластифицируют его. Это явление называют *эффектом П.А.Ребиндера*. Материал легче обрабатывается, поэтому в состав смазочно-охлаждающих жидкостей, применяемых при механической обработке металлов, добавляют ПАВ. Вторым проявлением эффекта является проникновение молекул ПАВ в систему микротрещин и места скопления дислокаций. Добираясь до устья микротрещины, молекулы ПАВ, стремясь к началу устья, действуют как клин, раздвигают микротрещину, и она продвигается дальше внутрь материала. Так понижается прочность всего тела, которое при определенных условиях без силового воздействия может распасться на мелкие блоки.



Р и с. 3.9. Капиллярный эффект

Наиболее важными для трибологии физико-механическими показателями поверхностных слоев являются *микротвердость* (H_μ), модули Юнга и сдвига (E, G), *предел сдвиговой прочности* (τ_s). Эти показатели определяют процессы трения и изнашивания. Микротвердость определяется чаще всего методом вдавливания в исследуемую поверхность алмазной пирамиды с углом между гранями 136° под нагрузкой N . Под микроскопом измеряют диагональ отпечатка (d). Величина микротвердости рассчитывается по формуле

$$H_\mu = 1.854 \cdot N/d^2 . \quad (3.9)$$

Метод стандартизирован. Величина микротвердости связана с пределом текучести при растяжении (σ_s) и пределом сдвиговой прочности:

$$H_\mu \cong 3\sigma_s \cong 6\tau_s . \quad (3.10)$$

С понижением температуры (начиная от комнатной) микротвердость меняется слабо в сторону повышения. При увеличении температуры микротвердость существенно снижается для многих металлов по закону:

$$H_\mu = A \exp\left(-\frac{\alpha T}{T_m}\right), \quad (3.11)$$

где A, α – коэффициенты; T_m - температура плавления.

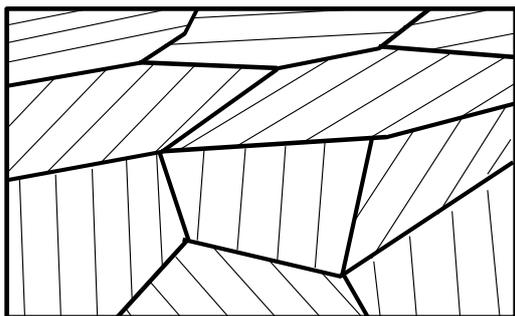
Для оценки физических свойств поверхностных слоев применяются методы оптической, электронной, ионной микроскопии, рентгеновского спектрального микроанализа, дифракции медленных электронов и рентгеновских лучей с малыми углами скольжения, экзoeлектронной эмиссии и др.

4.7. Влияние механической обработки на служебные свойства поверхностного слоя. Характеристики шероховатости поверхностей

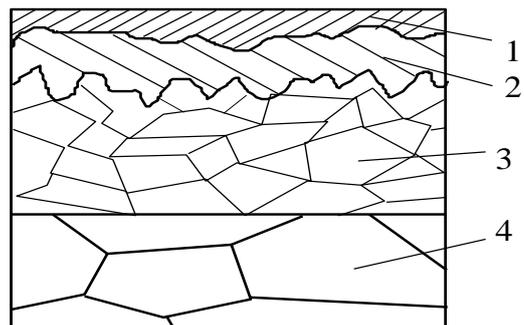
Механическая обработка конструкционных материалов в ходе изготовления деталей вносит существенные изменения в строение и свойства поверхностных слоев. Одна из причин - упругая и пластическая деформация. При механическом воздействии интенсивно образуются и перемещаются дислокации, возникают новые структуры, связанные с измельчением и ориентацией зерен в направлении действия сил. Деформирование (вытягивание) зерен и их ориентация происходят не только при механической обработке поверхностей, но и при трении. Подобное изменение структуры в поверхностных слоях называют текстурированием. Наличие ориентации текстурированных зерен, происходящее в направлении движения обрабатывающего инструмента или трения, изменяет прочность, твердость материала, магнитные, электрические и другие свойства, рис. 3.10. Текстурированные слои обладают высокой степенью анизотропии.

При текстурировании, образовавшемся при обработке или трении, в самом поверхностном слое и в подслое возникают остаточные напряжения растяжения-

сжатия, различные дефекты в виде микротрещин и пор. Пластическое деформирование сопровождается тепловыделением. Рост локальных температур ускоряет



Р и с. 3.10. Текстурирование



Р и с. 3.11. Строение граничного слоя

Таблица 3.2.

Свойства деформированного слоя

Вид обработки	$H_{\mu\text{пов}}/H_{\mu\text{объемн.}}$	Толщина слоя 3, мкм
Точение	1,2 – 2	30 - 200
Фрезерование	1,4 - 2	40 - 200
Чистовое точение	1,5 - 2	20 - 75
Шлифование	1,5 - 2,5	30 - 60
Притирка	1,1 - 1,2	3 - 7

окислительные процессы, чему содействует среда (охлаждающие эмульсии, смазки). В поверхностном слое при трении могут происходить фазовые превращения.

Изменение прочности при деформации поверхностного слоя называют деформационным упрочнением или наклепом. На рис. 3.10 и 3.11 показана схема граничного слоя после механической обработки. Верхняя часть 1 представляет собой слой адсорбированных молекул жидкостей и газов, включая ПАВ. Следующий слой 2 состоит из оксидов. Его толщина обычно порядка 10 нм. Сюда же входят пылевые включения, продукты износа инструмента. Слой 3 состоит из кристаллитов, подвергшихся изменениям под действием пластической деформации и температуры. Именно он и определяет эксплуатационные свойства (износостойкость) детали. Далее следует основа 4, не затронутая обработкой. Чем глубже распространяется пластическая деформация, например, при обработке резанием, раскатке, калибровке, тем толще слой 3. Из отделочных операций наибольшей толщины этот слой достигает при лезвийной обработке. В табл. 3.2 приведены данные о свойствах слоя 3.

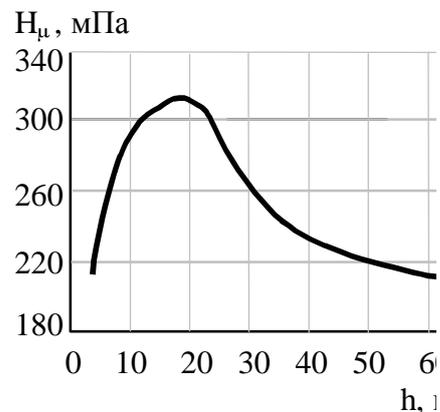
На рис. 3.12 показано типичное распределение микротвердости после механической обработки. Наибольшая твердость наблюдается не на поверхности, а на глубине порядка 10÷20 мкм. На стальных поверхностях верхний слой под влиянием трения или многократной пластической передеформации может разупрочняться. В нем происходит тонкое измельчение кристаллов и структура приближается к аморфной. Такой слой, толщина которого обычно составляет порядка 5 мкм, называется *слоем Бейльби*.

4.8. Краткая характеристика некоторых вопросов теории строения, природы свойств и состояния материала поверхностных слоев

Как уже отмечалось, в металлофизическом подходе на микроуровне изучаются свойства самих дефектов, природа их образования и миграции, возможность накопления и аннигиляции, характерные масштабы и т.д. Таким образом в металлофизическом аспекте под поверхностным слоем понимается несовершенное кристаллическое твердое тело, обладающее анизотропией механических свойств.

Для оценки свойств поверхностных слоев используются электронная и ОЖЕ-спектроскопия, металлографический и рентгеноструктурный анализ, что позволяет выявить доминирующий вид дефектов и строение диссипативных структур, развивающихся при трении, а также глубину их расположения.

Металлографический подход к изучению процессов, происходящих при изнашивании, является особенно интересным и многообещающим для объяснения наблюдаемых изменений в состоянии материала с позиций кинетической и синергетической теорий, которые позволяют установить связи между процессами, протекающими в поверхностных слоях на разных масштабных уровнях.



Р и с. 3.12. Распределение микротвердости по глубине

Микроскопические акты образования дефектов являются основой, определяющей поведение материалов на микро- и макроуровнях. Появление каждого дефекта влечет за собой соответствующее изменение общего состояния поверхностного слоя, характеризуемого внутренней энергией и энтропией.

Согласно термодинамике поверхностный слой можно рассматривать как открытую термодинамическую систему, способную обмениваться энергией и веществом с окружающей средой и характеризуемую комплексом интенсивных характеристик. Наличие сорбционных процессов на поверхности материалов делает их схожими с мембранами, но, в отличие от обычных мембранных систем, поверхностный слой обладает еще и объемными характеристиками и, следовательно, комплексом собственных интенсивных характеристик. В рамках термодинамического подхода стало возможным пользоваться общими понятиями и использовать параметры состояния, пригодные для описания любых макроскопических систем, а также в удобной форме, через изменение термодинамических потенциалов, учитывать адсорбционные и другие эффекты. Применительно к описанию изнашивания были попытки установить уравнения состояния поверхностного слоя в виде общих уравнений баланса энергии или баланса энтропии. Это привело к созданию энергетических моделей, например Ю.К. Машковым, представляющих функциональную зависимость скорости изнашивания от термодинамических факторов:

$$J = f(U, S, t, \dots), \quad (3.12)$$

где J - интенсивность изнашивания; U - внутренняя энергия; S - энтропия; t - время.

В основу термодинамического подхода легли следующие идеи:

в поверхностном слое изнашиваемого материала можно выделить объем, находящийся в состоянии локального равновесия;

процессы трения и изнашивания могут быть описаны уравнениями энергетического баланса;

скорость деструкции контролируется скоростью производства энтропии.

Уравнение баланса энтропии записанное для локальной области (локальное термодинамическое равновесие) имеет вид:

$$\rho \frac{dS}{dt} + \text{div}S = \sigma [S], \quad (3.13)$$

где $\rho \frac{dS}{dt}$ - скорость прироста энтропии в данной области; $\text{div}S$ - скорость оттока энтропии из данной области в окружающую среду; $\sigma[S]$ - скорость возникновения или производства энтропии внутри данной области.

В подобных моделях, однако, не учтен тот факт, что в процессе деформации активируются самоорганизующиеся диссипативные процессы, в результате которых перед разрушением в деформируемом материале вместо ожидаемого хаоса и деградации наблюдаются высокоупорядоченные структуры, т.е. из системы непрерывно «откачивается» энтропия, образуемая в ходе накопления дефектов. Кроме того, известен факт, что на стадии исчерпания пластичности преимущест-

венная роль отводится коллективным процессам, охватывающим масштаб больший, чем размеры локальных областей внутри дислокационных ячеек, учет которых в выражении не предусмотрен.

Объединяет различные подходы к пониманию происходящих процессов кинетическая теория прочности, развиваемая под влиянием идей российского академика С.Н. Журкова. Опираясь на успехи, достигнутые в области изучения деформации и разрушения материалов, эта теория выдвигает положение об общей термоактивационной природе химических, механохимических и механических процессов, осуществляемых путем преодоления энергетического барьера. С позиции кинетической теории поверхностный слой рассматривается как тело, состоящее из множества структурных составляющих - кинетических единиц, в качестве которых могут приниматься атомы и молекулы вещества, т.е. элементы, совершающие тепловые колебания. При кинетическом описании явлений, происходящих по термоактивационному механизму, используются следующие предположения:

в основе механизмов накопления повреждений и усталостного разрушения поверхностного слоя лежат термоактивируемые кинетические процессы;

зависимость между скоростью деструкции материала J и внешними факторами устанавливается через его активационные параметры: энергию активации U_0 и структурно-чувствительный коэффициент γ :

$$J = f (U_0 , \gamma , \sigma , T , \dots) . \quad (3.14)$$

Так, при исследовании кинетики процесса ползучести материалов обнаружилось, что скорость деформации в зависимости от внешних факторов может быть достаточно хорошо описана выражением Аррениуса подобно описанию скорости химических реакций:

$$\ln k = - \frac{E}{R \cdot T} + B , \quad (3.15)$$

где k - константа скорости реакции; E - энергия активации химической реакции.

Это дало повод предположить, что в процессе деформации на микроуровне реализуются элементарные акты, имеющие термоактивационную природу, а скорость процесса, по аналогии с кинетикой реакций, контролируется высотой энергетического барьера, который удерживает активационную частицу материала в устойчивом состоянии.

В кинетической теории в качестве активационных частиц принимают атомы и молекулы вещества, для которых возможны акты разрушения связей под действием тепловых флуктуаций. Так как тепловое поле кристаллов на микроуровне не является однородным, в результате случайного взаимодействия отдельные атомы могут приобрести избыточную кинетическую энергию, достаточную для самостоятельного преодоления энергетического барьера и перехода в новое устойчивое состояние.

Применительно к изучению длительной прочности и долговечности твердых тел термофлуктуационная теория нашла наиболее полное развитие в трудах академика С.Н. Журкова и его учеников, которые на основе анализа вероятности про-

явления тепловых флуктуаций получили выражение долговечности единичной связи в поле действующих механических напряжений

Основной мыслью этой концепции является то, что разрушение межатомной связи происходит в результате случайного появления избытка кинетической энергии у атома (термической флуктуации), а внешнее напряжение оказывает влияние только на величину потенциального барьера, уменьшая его. Таким образом, было установлено, что неустойчивость материала, приводящая к его деформации или разрушению, может быть вызвана за счет термоактивационного и атермического механизмов. В терминах кинетической теории в первом случае энергетический барьер преодолевается «снизу», как это происходит при нагреве материала, что вызывает увеличение кинетической энергии всех частиц и соответственно вероятность появления разрушающей флуктуации. Во втором - барьер преодолевается «сверху», так как за счет механического отклонения частиц от положения равновесия уменьшается величина энергии активации критической флуктуации.

Большой экспериментальный материал по исследованию длительной прочности материалов показал, что выражение для оценки долговечности единичной атомной связи остается справедливым и для описания долговечности макроскопических тел, находящихся в поле действующих нагрузок и температур. Исследования энергии активации разрушения металлических образцов при высокотемпературной ползучести показали, что ее величина тождественна энергии активации сублимации атомов. Аналогичное тождество было обнаружено и для процесса деформации, что выражается близкими значениями энергий активации ползучести материалов и самодиффузии атомов.

Таким образом, в соответствии с термофлуктуационной теорией прочности можно записать выражение для долговечности единичной связи τ_p (долговечность здесь - время существования единичной связи под нагрузкой):

$$\tau_p = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_{\sigma}}{R \cdot T}\right); \quad \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \cdot \exp\left(-\frac{U(\sigma)}{R \cdot T}\right); \quad (3.16)$$

$$U_{\sigma} = U_0 - \gamma \cdot \sigma, \quad (3.17)$$

где $\dot{\varepsilon}$ - скорость ползучести; $\dot{\varepsilon}_0$ и τ_0 - постоянные, зависящие от дебаевской частоты атомных колебаний; $U(\sigma)$ - эффективная энергия активации; U_0, γ - активационные параметры.

Однако исследования кинетики деформации показали, что активационные параметры, при переходе определенных значений температур способны скачком изменяться. Причем было установлено, что каждое изменение параметров соответствует смене доминирующего диссипативного механизма. Впервые этот эффект был обнаружен Дорном при исследовании ползучести металлов, когда для различных механизмов деформации был получен спектр значений энергии активации. В.И. Владимировым было также установлено существование при трении различных механизмов диссипации энергии, хотя такое усложнение модели изучаемого объекта уже выходит за пределы возможностей кинетического подхода.

Объединение микро-, мезо- и макроскопических процессов оказалось под силу

новой теории, называемой «синергетика».

Сам термин «синергетика» происходит от греческого «синергос» - «вместе действующий».

Синергетика занимается изучением процессов самоорганизации, устойчивости и распада структур различной природы, происходящих в неравновесных системах на основе соединения принципа материального единства мира с принципом развития.

С этой точки зрения деформируемый материал поверхностного слоя может рассматриваться как функциональная система, которая в условиях непрерывного притока энергии извне начинает проявлять признаки живой материи; обнаруживаются эффекты памяти, наследственности, самоорганизации, фазовых превращений, реакции системы на изменения внешних факторов и т.д. Синергетический подход, развиваемый в трудах Г.Хакена, Д. Кайзера, В.С. Ивановой, Л.И. Бершадского и др., рассматривает разрушение материала поверхностного слоя как следствие катаклизмов, в которых система или ее локальные составляющие достигают точки бифуркации - неустойчивости, предшествующей смене диссипативного механизма.

4.9. Обзор известных способов оценки активационных параметров разрушения материалов

Работы по экспериментальной оценке активационных параметров материалов осуществлялись на основе проведения многочисленных экспериментов при испытаниях образцов материалов на длительную прочность. Среди них можно выделить два направления: первое - развивалось советскими учеными В.Р. Регелем, А.И. Слуцкером, Э.И. Томашевским, В.В. Шпейzmanом и др. под влиянием идей С.Н. Журкова. Второе - развивалось школой под руководством Д. Дорна и опиралось на общие представления о термической активации. Различие в этих направлениях состоит в том, что исследования в первом направлении проводились на базе существующей термофлуктуационной теории, во втором направлении за основу была принята феноменологическая зависимость, которая наиболее близко отвечала экспериментальным результатам, с тем чтобы создать экспериментальную базу для разработки новых теорий. Несмотря на общий термодинамический подход, указанные школы использовали различные методы оценки активационных характеристик. Это привело к взаимодополнению выводов, полученных из анализа проведенных испытаний. Экспериментальные результаты оценки активационных параметров оказалось возможным сопоставить с их аналитическим определением.

При аналитической оценке активационных параметров используют представления Беккера об энергии активации как изотермической и обратимой работе, которую необходимо затратить в объеме V , чтобы довести его до состояния локального сдвига. Из этих соображений В.В. Федоров получил следующее выражение для оценки эффективной энергии активации:

$$U_0 = V \cdot \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{2 \cdot G}, \quad (3.18)$$

где σ_0 - теоретическая прочность на сдвиг; G - модуль сдвига; V - локальный объем материала.

В свою очередь, на основе анализа ангармонизма тепловых колебаний межатомных связей активационные параметры U_0 и γ были выражены через коэффициент теплового расширения α , атомную теплоемкость C и модуль Юнга E :

$$U_0 = \varepsilon_* \cdot C / \alpha \quad \text{и} \quad \gamma = C \cdot \chi / \alpha \cdot E, \quad (3.19)$$

где ε_* - разрывная деформация атомной связи; χ - коэффициент механической перегрузки.

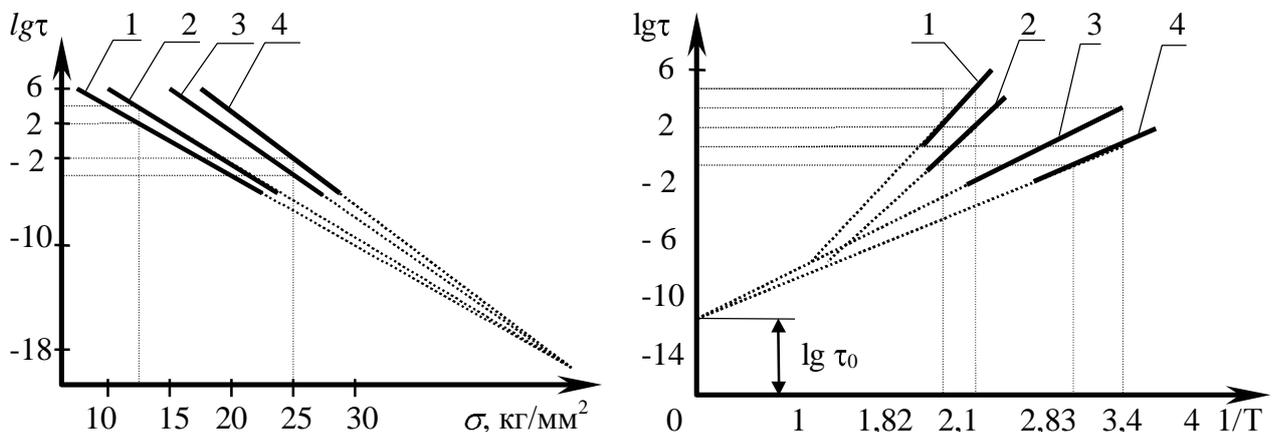
Однако сложность использования аналитических методов оценки активационных параметров связана с неприменимостью справочных данных для расчета вследствие ряда особенностей модифицированного состояния материала поверхностного слоя. Их экспериментальная оценка, например методами дифракции медленных электронов, спектроскопии поверхности и т.п., весьма затруднительна и делает этот способ оценки нерациональным.

По этой причине реальное развитие происходило в сфере разработки прямых экспериментальных методов. Первоначально, на основе концепции С.Н. Журкова, экспериментальную оценку энергии активации разрушения материалов производили путем испытания образцов материалов на длительную прочность.

При этом образцы материалов подвергали нагружению (растяжению, сжатию, сдвигу), определяли долговечность τ при ряде значений температуры и напряжения и строили графики зависимости $\lg \tau = f(\sigma^{-1})$ (рис. 3.13,б), из которых по формуле

$$U_0 = 2,3 \cdot R \cdot \frac{\Delta \lg \tau}{\Delta \sigma^{-1}} \quad (3.20)$$

определяли значения U_0 при различных напряжениях. Затем строили графики зависимости $U=f(\sigma)$. Энергию активации разрушения U_0 находили путем экстраполяции зависимости U на значение $\sigma=0$.



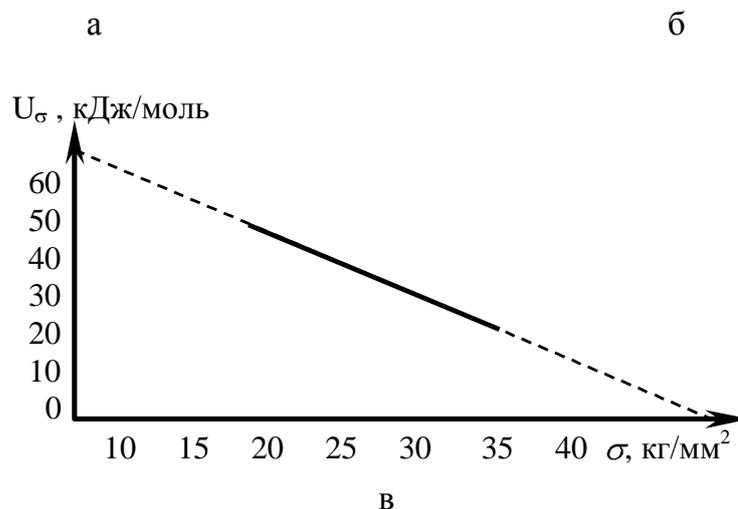


Рис 3.13. Результаты испытаний на длительную прочность:

а - влияние напряжения на длительную прочность (1 - 300°C, 2 - 200°C, 3 - 85°C, 4 - 18°C);
 б - влияние температуры на длительную прочность (1 - 10кг/мм², 2 - 15кг/мм², 3 - 20кг/мм²,
 4 - 25кг/мм²); в - зависимость энергии активации от напряжений

С целью повышения точности оценки энергии активации материала при характерном для трения напряженном состоянии в Самарском техническом университете в известный способ был внесен новый элемент, приближающий условия нагружения при испытаниях к условиям трения. Энергия активации определялась при сложном напряженном состоянии испытываемых образцов, подобном напряженному состоянию поверхностного слоя материала при трении. Такое напряженное состояние достигается путем одновременного приложения к образцу сжимающей и сдвигающей нагрузок с эквивалентным напряжением

$$\sigma_{\text{экр}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}, \quad (3.21)$$

где σ - нормальная, а τ - касательная составляющие действующих напряжений. Напряжения σ и τ определяют при экспериментальном измерении статического коэффициента трения для испытываемых образцов.

В связи с тем, что контактная деформация может осуществляться за счет различных механизмов, действующих на микроуровне, каждый из них имеет собственную величину энергии активации. Как уже отмечалось, самые существенные изменения в материале поверхностного слоя происходят непосредственно в процессе трения вследствие механического и физико-химического взаимодействия контактирующих поверхностей. Здесь имеется в виду деформация (наклеп), текстурирование материала, изменение его элементного состава (перенос вещества из контртела и внешней среды), химическая модификация (преимущественно образование оксидов), изменение плотности, теплопроводности и других характеристик, что приводит к существенному отличию значений энергии активации разрушения материала в поверхностном слое и в объеме.

Для учета влияния этих обстоятельств в Самарском техническом университете был предложен еще один способ оценки энергии активации пластической деформации материала поверхностного слоя, основанный на измерении микротвердо-

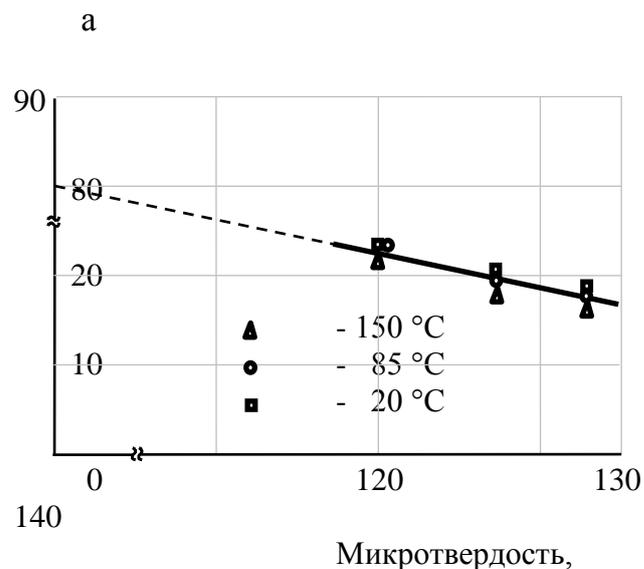
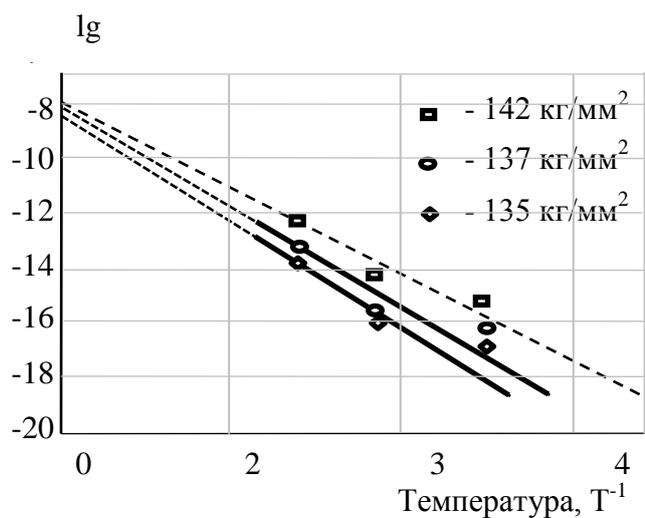
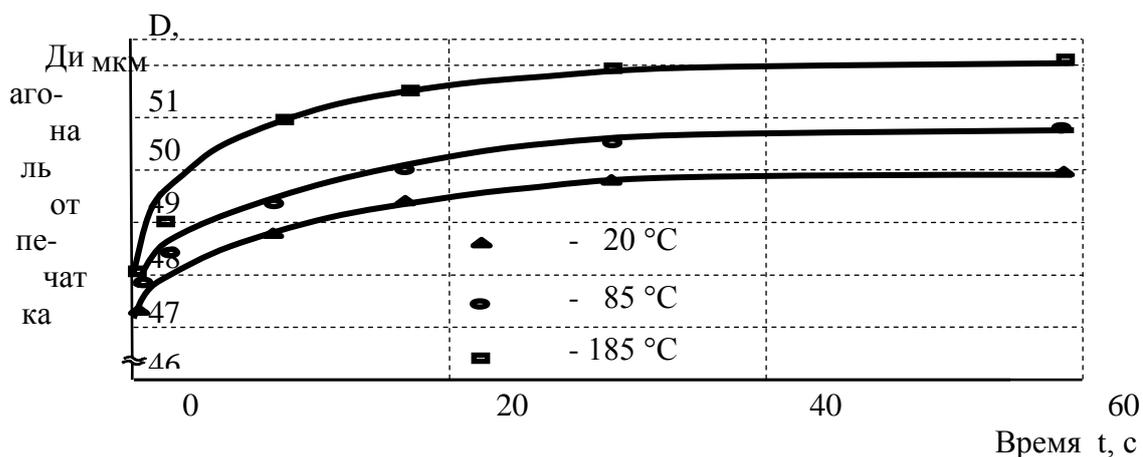
сти.

В этом способе измеряют диагональ отпечатка индентора микротвердомера D и время выдержки под нагрузкой t при различных температурах и нагрузках на индентор (рис. 3.14,а). По измеренным данным $D(t)$ находят скорость внедрения индентора \dot{h} и строят зависимости $\dot{h}(T^{-1})$, как это показано на рис. 3.14,б. Затем, аналогично (3.20), по формуле

$$U=2,3RT \lg(\dot{h}_0/\dot{h}) \quad (3.22)$$

получают зависимость $U=f(H\mu)$ и путем экстраполяции графика U при $H\mu=0$ находят энергию активации U_0 (рис. 3.14,в).

Главное преимущество этого способа состоит в том, что энергия активации разрушения исследуется в тонком поверхностном слое материала, отражающем аномалию его свойств. Однако при этом невозможно оценить влияние анизотропии механических свойств при совместном действии нормальных и касательных напряжений на поверхности при трении, что было достигнуто в другой разработке Самарского ГТУ, использовавшей вместо метода микротвердости метод склерометрии.



Р и с. 3.14. Иллюстрация способа оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя методом микротвердости:

- а - зависимость размера диагонали отпечатков от времени выдержки;
- б - зависимость скорости внедрения индентора от обратной температуры;
- в - зависимость энергии активации от нагрузки

4.10. Разработка и теоретическое обоснование нового способа оценки активационных параметров материалов при склерометрировании

Как уже отмечалось, с точки зрения термодинамики, поверхностный слой является сложной системой. Уникальность ее состоит в том, что поверхностный слой обладает как свойствами объемного твердого тела, с присущими ему структурой, составом, плотностью, твердостью и т.д., так и свойствами мембраны, являясь посредником между внешней средой и нижележащими слоями тела. Кроме того, поверхностный слой является открытой системой, что обусловлено его способностью пропускать и обменивать через границы раздела энергию и вещество. Как мембрана, поверхностный слой передает через себя тепловые, механические и другие воздействия, испытываемые телом извне, из среды вглубь материала и наоборот. Вместе с тем, как объемное твердое тело, поверхностный слой способен

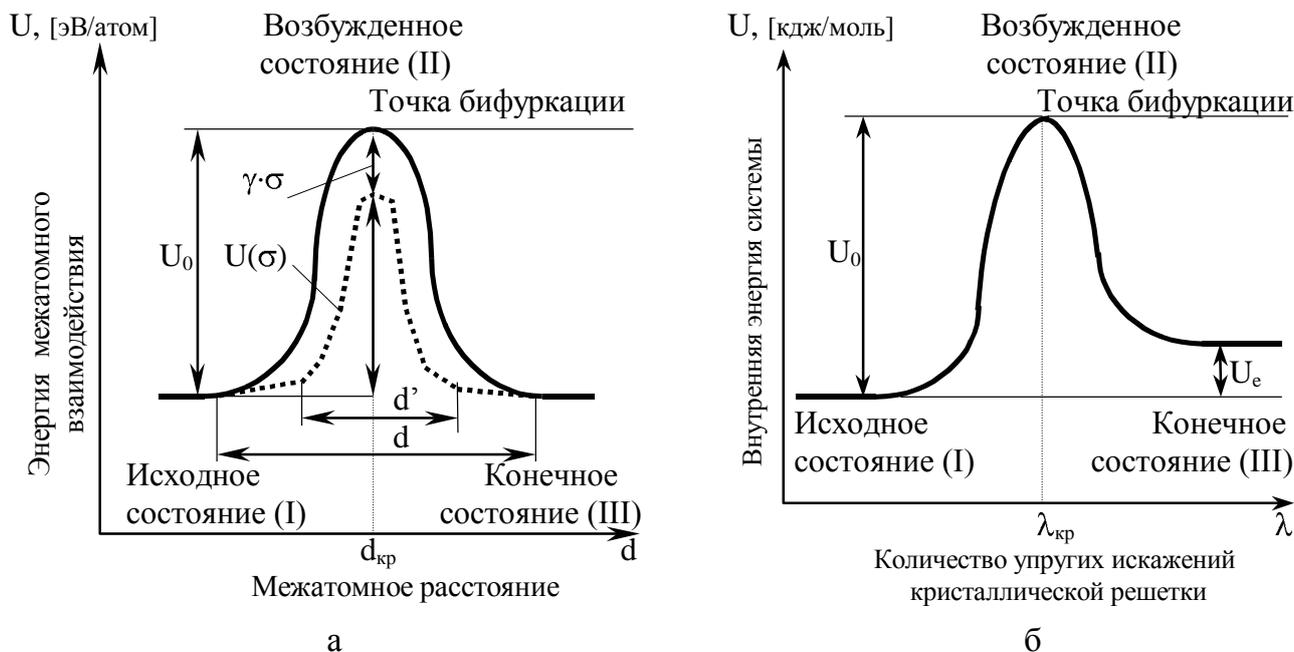
запасать в себе некоторую часть пропускаемой им энергии в виде тепла и микродефектов, что приводит к образованию специфических диссипативных структур.

Одной из важнейших функций состояния термодинамической системы является внутренняя энергия. Эта функция аддитивна; ее величина определяется суммой энергий, сосредоточенных в массе, а также в излучении вещества системы. В поверхностном слое, не затрагивая уровни ниже атомарного, эта энергия включает потенциальную энергию межатомных взаимодействий, кинетическую (тепловую) энергию атомов, энергию дефектов кристаллической решетки, а также свободную энергию, обусловленную несовершенством кристаллической решетки на границе «металл-среда».

Каждая система стремится к некоторому устойчивому в данных условиях состоянию. Несмотря на то, что любой процесс, в котором участвует система, вызывает изменение ее внутренней энергии, это изменение чаще всего носит компенсирующий характер. Так, например, при упругих деформациях тело запасает такое количество внутренней энергии, которое ему необходимо, чтобы совершить работу по восстановлению исходной формы. Наиболее устойчивым состоянием системы является такое, при котором ее свободная энергия становится минимальной. По этой причине в термодинамических системах происходит самопроизвольная активация механизмов, которые при данных условиях наиболее эффективно понижают внутреннюю энергию системы. К таким механизмам можно отнести упругое восстановление формы кристаллической решетки после снятия внешних деформирующих напряжений, теплоотвод, выход дефектов из кристаллической решетки, адсорбцию и хемосорбцию частиц среды свободной поверхностью. В зависимости от внешних условий эти процессы протекают самопроизвольно с различными скоростями. Так, например, при трении поверхность практически мгновенно покрывается различными пленками, которые в определенной мере компенсируют избыток свободной энергии металла.

Однако не всегда система может реагировать на внешние процессы обратимо. Существуют определенные пороговые значения внутренней энергии, в которых система теряет устойчивость, и ее самопроизвольный возврат в прежнее состояние становится невозможным. Точка на диаграмме состояния материала, в которой устойчивое состояние сменяется неустойчивым, называется точкой бифуркации, а процесс, сопровождающийся переходом системы через точку бифуркации, называется кинетическим. К ним можно отнести пластическую деформацию, хемосорбцию, диффузию и другие процессы, в ходе которых образуются новые устойчивые образования, формы или соединения. Высота энергетического барьера, численно равная разности между внутренней энергией системы в исходном и неустойчивом (активированном) состояниях, и является энергией активации этих процессов.

Изнашивание материалов при трении схематично можно представить в виде последовательности «устойчивость (I) - неустойчивость (II) - устойчивость (III)» (рис. 3.15). В этом случае значение энергии активации разрушения поверхностного слоя при трении равно разности внутренней энергии системы в исходном (I) и активированном (II) состояниях.



Р и с. 3.15. Энергетическая диаграмма кинетических переходов (I) – устойчивость, (II) – неустойчивость (III) – устойчивость: d - среднее межатомное расстояние; d' - межатомное расстояние под действием внешней нагрузки; λ - параметр повреждаемости; U_0 - энергия активации процесса; $U(\sigma)$ - эффективная энергия активации; U_e - запасенная энергия решетки; $\gamma\sigma$ - механическая работа по растяжению межатомной связи

Существует несколько подходов к физической интерпретации понятия энергии активации. Первый, предложенный Р.Беккером, рассматривает ее как обратимую изотермическую работу, которую необходимо затратить для активации исследуемого процесса. Вторым подходом, использованным В.Кауцманом и Г.Эйрингом, основан на теории абсолютных скоростей реакций, согласно которой энергия активации равна необратимому изменению изобарно-изотермического потенциала системы. Однако современный уровень знаний об иерархии и эволюции диссипативных процессов в деформируемом материале позволяет утверждать обоснованность обоих подходов, но применительно к соответствующим масштабным уровням.

Единый акт разрушения межатомной связи согласно термофлуктуационной теории происходит за счет суммарной энергии механического отклонения частиц от положения равновесия и энергии термической флуктуации (см. рис. 3.15,а). Если энергии термической флуктуации окажется недостаточно, чтобы преодолеть потенциальный барьер U_0 , частица вернется в исходное положение. Следовательно, работа по растяжению межатомной связи между состояниями (I), (II) совершается упруго, т.е. обратимо. Согласно теории точечных дефектов Зинера данная работа совершается изотермически. Таким образом, для оценки появления единичных актов повреждения на микроуровне пригоден подход Р.Беккера.

Переходя к мезо- и макроуровням, необходимо отметить, что процесс пластической деформации сопровождается необратимым накоплением повреждений в материале (увеличение плотности дислокаций). При этом совершаемая механиче-

ская работа деформации единицы объема будет равна увеличению изобарно-изотермического (термодинамического) потенциала системы при появлении единичной дислокации в единице объема. Поскольку дислокации при пластической деформации накапливаются в объеме, то повышение внутренней энергии мы, обусловленное упругими искажениями кристаллической решетки, будет порционально увеличению их плотности (см. рис. 3.15,б). Следовательно, на мезо- и макроуровнях применим подход В.Кауцмана и Г.Эйринга. Данный подход, объясняющий возможность потери устойчивости системы на макроуровне за счет постепенного накопления повреждений, является физически обоснованным, поскольку возбужденное состояние не может быть обеспечено однократным появлением термической флуктуации в материале, находящемся в исходном состоянии. С другой стороны, при этом реализуется термоактивационный механизм разрушения, так как в состоянии предразрушения (вблизи точки бифуркации системы) появление единичного повреждения за счет термических флуктуаций но вызвать неустойчивость всей макросистемы.

Третий подход, объединяющий первые два, состоит в том, что энергия активации оценивается как повышение внутренней энергии мезо- (или макро-) системы за счет суммарной работы, затраченной на упругое смещение частиц материала от положения равновесия, понижающее энергию образования единичных повреждений, и на необратимый рост числа дислокаций в плоскостях скольжения до величины, при которой активируется сдвиг решетки по данной плоскости, т.е. пластическая деформация материала. Этот подход является наиболее справедливым для описания синергетических процессов на стадии сосредоточенных деформаций (предразрушения), когда основная роль в диссипации энергии трения отводится дислокационным субструктурам (блокам, фрагментам), которые являются объектами мезоскопического уровня.

Рассматривая трибологические процессы, можно также отметить три стадии развития усталости в материале. Исходное состояние (I) соответствует приработанному в заданных условиях материалу поверхностного слоя. Возбужденное состояние (II) соответствует точке бифуркации, в которой материал теряет устойчивость. Чтобы вызвать это состояние необходимо передать материалу часть энергии для активации механизмов, приводящих к его разрушению. На заключительной стадии (III) материал приобретает новое устойчивое состояние, соответствующее завершению кинетического цикла. Процессы деформации и разрушения завершаются отеснением (либо удалением) активированного вещества из зоны действия напряжений.

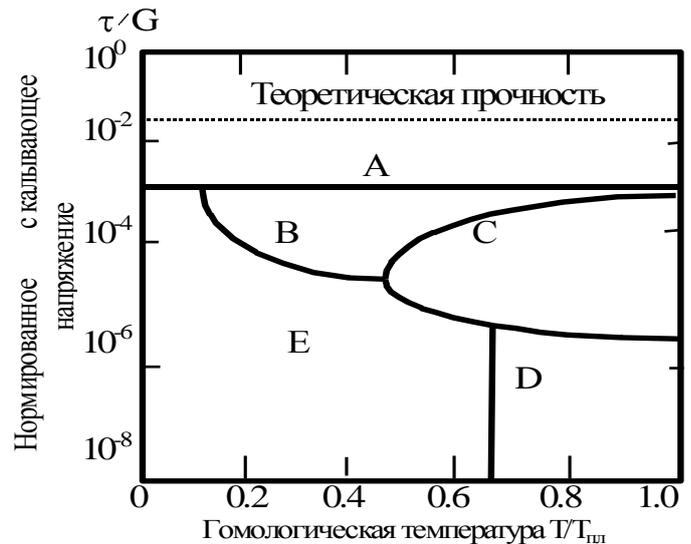
Как ранее было отмечено, деформация и разрушение металлических материалов могут быть вызваны различными механизмами, действующими на микроуровне (рис. 3.16). Активация того или иного механизма определяется совокупностью значений внешних факторов, действующих на материал. Наиболее существенное влияние на прочность материалов оказывают напряжения, температура, а также химическая активность рабочих сред. При эксплуатации металлических изделий скорость их деформации и разрушения контролируется теми величинами U_0 и γ , которые соответствуют доминирующему в данных условиях механизму.

В гл.1 было показано, что нагрузки в зонах фактического контакта трущихся поверхностей превышают предел текучести. Но известно, что процесс накопления повреждений в поверхностном слое при циклических нагрузках, превышающих предел текучести, подобен малоциклового усталости. Малоцикловая усталость поверхностного слоя является основной причиной его разрушения при наиболее распространенных видах механического и коррозионно-механического изнашивания: усталостного, абразивного, фреттинг-коррозии и др.

В условиях высоких напряжений и умеренных температур, не превышающих $0,5T_{пл}$, деформация материалов преимущественно обусловлена действием механизма скольжения дислокаций. В отличие от механизма ползучести, скольжение дислокаций может происходить с высокими скоростями, соизмеримыми со скоростью звука в металле. Пластическая деформация получила название мгновенной, поскольку релаксация наступает практически за время существования деформирующих напряжений. Однако это справедливо лишь в том случае, когда действующие напряжения близки к значению истинной прочности материала на разрыв. В более общем случае, когда действующие напряжения превышают предел текучести материала, но не достигают разрывного напряжения, процессы пластической деформации и разрушения материалов являются термоактивируемыми и происходят со скоростями меньшими, чем скорость звука. При этом скорость образования и скольжения дислокаций определяются не только интенсивностью деформации, но и температурой материала, наличием в нем дефектов, создающих локальные, препятствия для подвижных дислокаций и другими факторами.

Специфика оценки энергии активации разрушения U_0 и структурно-чувствительного коэффициента γ в поверхностных слоях, модифицированных трением, состоит в следующем.

1. Реальный материал поверхностного слоя после приработки сохраняет кристаллическое строение, но в результате физико-химической модификации он насыщается всеми видами дефектов. Неоднородность и анизотропия материала поверхностного слоя не позволяют использовать для его описания классические



Р и с. 3.16. Пример деформационной карты чистого никеля:

- A - дислокационное скольжение без участия возврата; B - дислокационная ползучесть (диффузия вдоль ядер дислокаций);
- C - дислокационная ползучесть (объемная диффузия); D - диффузионная ползучесть Набарро-Херринга; E - диффузионная ползучесть Кобле

теории (упругости, пластичности и др.). Поэтому оценить активационные характеристики при помощи известных теоретических методов не представляется возможным. Единственным источником данных в этом случае остается эксперимент.

2. Накопление повреждений при трении происходит в поверхностном слое определенной толщины, так называемом debris-слое. Наиболее характерная глубина debris-слоя имеет мезоскопические размеры порядка 1-3 мкм. Следовательно, масштабный уровень эксперимента должен быть достаточно большим, чтобы полученные оценки отражали общее, усредненное состояние модифицированного материала поверхностного слоя, но и достаточно малым, чтобы не выйти за пределы изучаемого слоя.

3. При исследовании активационных характеристик была установлена их зависимость от создаваемого при испытаниях схемы напряженно деформированного состояния. При трении создается сложное напряженно-деформированное состояние материала поверхностного слоя при действии нормальных и касательных нагрузок, упругих и пластических деформаций выступов контактирующих тел. Следовательно, эксперименты должны выполняться при напряженно-деформированном состоянии, адекватном тому, которое создается в зоне контакта при реальном трении.

4. В результате многократной пластической деформации поверхностного слоя при трении металлические зерна вытягиваются в направлении трения и образуется специфическая текстура поверхностного слоя (вторичная анизотропия). При этом деформационные и прочностные характеристики материала начинают изменяться в зависимости от направления действия внешних нагрузок. Поэтому при испытаниях необходимо прилагать нагрузки к образцу в том же направлении, в котором они действовали при трении.

5. Энергия активации U_0 и структурно-чувствительный коэффициент γ зависят от действующего микромеханизма повреждения. Как было отмечено, при трении доминирующим механизмом является образование и скольжение дислокаций. Следовательно, при испытаниях необходимо создать условия для активации этого механизма.

В связи с отмеченным расчетную модель энергии активации на основании теории С.Н.Журкова можно представить в виде

$$U_0 = 2,3 \cdot R \cdot T \cdot \lg \left(\frac{\tau_p}{\tau_0} \right) + \sigma \gamma \pm \Delta G. \quad (3.23)$$

Число слагаемых в правой части равно числу основных факторов разрушения поверхностного слоя. Первое слагаемое - термическое. Оно содержит часть внутренней энергии системы, составляемую тепловыми колебаниями атомов в узлах кристаллической решетки. Второе слагаемое - механическое, является частью внутренней энергии, поставляемой в систему за счет упругого искажения кристаллической решетки от внешних механических воздействий. Оно также включает часть механической энергии, затраченной на образование дефектов и перешедшей при трении в энергию упругих искажений кристаллической решетки поверхностного слоя. Третье слагаемое представлено в виде обобщенного параметра

ΔG , имеющего химическую природу. Он отражает суммарный эффект, производимый физико-химическим взаимодействием поверхностного слоя со средой. В условиях инертной среды можно принять $\Delta G \cong 0$. Оценку энергии активации разрушения производят путем возбуждения этого процесса в испытуемом материале при помощи одного или нескольких разрушающих факторов. По экспериментальным данным рассчитываются величина слагаемых данной модели и собственно энергия активации разрушения.

Величина энергии активации в существенной мере зависит от природы действующего механизма разрушения. Поэтому каждый материал имеет столько значений энергий активации разрушения, сколько существует механизмов этого процесса. Как отмечалось, потерю устойчивости и, как следствие, деформацию или разрушение материалов могут вызвать три основных фактора: термический, механический и химический. Все они, в общем случае, воздействуют на материал одновременно, но не в равной степени. В реальности достаточно выделить и рассматривать только один механизм разрушения, который при данных условиях является ведущим. Этот механизм должен иметь наименьшую величину энергии активации. В большинстве практических случаев таким механизмом при трении является сдвиг кристаллической решетки материала поверхностного слоя в зонах фактического контакта, который обуславливает пластическую деформацию поверхностного слоя и малоцикловую усталость, что в конечном счете приводит к его разрушению. Отличительной особенностью данного механизма разрушения является то, что он проявляется при достаточно высоких внешних напряжениях и сохраняет устойчивость вплоть до появления атермических разрывов межатомных связей. Это позволяет применить для оценки энергии активации разрушения поверхностного слоя при пластической деформации метод механической активации.

Оценка активационных параметров разрушения при механической активации материала может выполняться лишь при условии, что действующие при испытаниях нагрузки близки к истинной прочности материала на разрыв (при растяжении) или твердости (при сжатии). В этом случае можно принять, что $\dot{\epsilon} \cong \dot{\epsilon}_0$ и $\tau_p \cong \tau_0$. Это допущение оправдано тем, что при действии максимальных для данного материала нагрузок скорость деформации и время до разрушения принимают также максимальные значения. Поэтому такие нагрузки способны вызвать практически мгновенную потерю устойчивости (разрыв, деформацию) испытываемого образца. При указанных допущениях первое слагаемое в выражении (3.23) становится пренебрежимо малым, так как отношение τ_p к τ_0 приближается к единице. Таким образом, в этом случае процесс можно рассматривать как атермический. Поскольку первое слагаемое при указанных условиях обращается в нуль, можно исключить из анализа фактор времени, что придает испытаниям экспрессный характер. Механический способ активации опирается на следующее обоснование. Как отмечалось выше, второе слагаемое, согласно термофлуктуационной концепции, имеет механическую природу. Известно, что механическая энергия, затраченная на активацию какого-либо процесса, имеет смысл механической работы A , которая может определяться как работа напряжений или работа сил:

$$A = \iiint_V \sigma dV = \int F_L dL. \quad (3.24)$$

При механическом возбуждении энергию активации можно интерпретировать как работу напряжений, затраченную на пластическое оттеснение элементарного объема dV , или работу сил по перемещению частиц материала на элементарном пути dL . Второе определение является более удобным, так как экспериментальная оценка параметров F_L и L производится проще, чем σ и V .

Поскольку механический способ активации деформации и разрушения поверхностного слоя позволяет производить воздействие на исследуемый материал в любом направлении и на любом выбранном участке поверхности, а также активировать процесс малоциклового усталости за счет многократного повторения деформирующих воздействий, этот способ отвечает требованиям объективности при воссоздании процессов, имеющих место при трении, и является оптимальным для изучения активационных характеристик материала поверхностного слоя. Разработка такой методики выполнена в Самарском техническом университете в 1995 - 1998 гг. Д.Г. Громаковским, И.Д. Ибатуллинским и А.Г. Ковшовым.

Для оценки механических свойств поверхностного слоя чаще всего применяются методы пенетрации (вдавливания) и склерометрии (царапания) поверхности твердыми инденторами. Принципиальное различие этих двух методов состоит в схеме приложения нагрузок: в первом случае нагружение происходит только в нормальном направлении, во втором - индентор воздействует на поверхностный слой в нормальном и касательном направлениях. Второй случай более близок к процессу деформации, происходящему при реальном трении, поэтому он представляется наиболее целесообразным при трибологических исследованиях поверхностного слоя.

Метод склерометрии заключается в том, что в исследуемую поверхность под воздействием нормальной нагрузки внедряют индентор, затем, приложив тангенциальное усилие, осуществляют относительное перемещение индентора, в результате чего образуется канавка с металлом, оттесненным на ее края за счет сдвига. Размеры канавки используются для оценки механических характеристик материала. Инденторы для этих целей изготавливаются из твердых материалов (монокристаллы сапфира, алмаза), как правило, в форме правильной пирамиды или конуса.

Царапание по ГОСТ 16429-70 определяется как процесс образования углублений на поверхности в направлении скольжения под воздействием выступов твердого тела или частиц. Царапание может осуществляться в разных режимах: микрорезания, пластического оттеснения материала и образования выступа перед индентором. Влияние различных факторов на режимы царапания показаны на рис. 3.17.

Метод склерометрии широко известен и применяется в трибологии уже достаточно долгое время. В числе первых исследователей этого метода были Д.Тейбор, В.Д.Кузнецов, И.В.Крагельский, Н.Н.Давиденков, М.М.Хрущев и др. Данный метод имеет многоцелевой характер, и поэтому в настоящее время он находит применение во многих странах при решении широкого спектра задач.

Кроме адекватности напряженно-деформированного состояния при царапании и контактном взаимодействии выступов трущихся поверхностей, применение метода склерометрии можно обосновать следующим:

царапание позволяет произвести деформацию материала поверхностного слоя на необходимой глубине в зависимости от приложенной нормальной нагрузки;

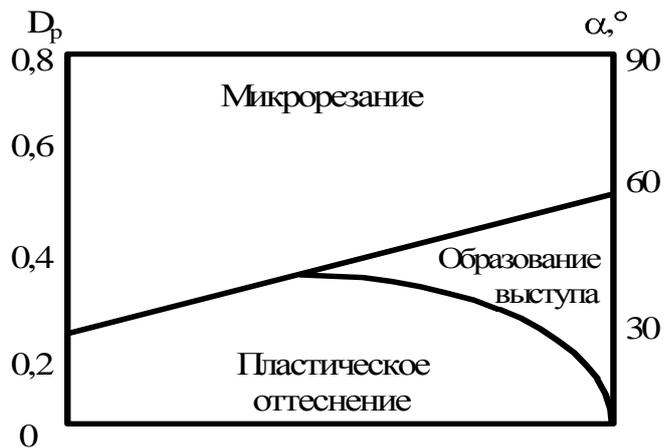
высокие контактные нагрузки $p_f \cong H_{\mu}$ при царапании обеспечивают условие, необходимое для активации дислокационного механизма повреждения поверхностного слоя, наиболее часто наблюдаем при пластическом деформировании;

выбор направления царапания позволяет выявить анизотропию свойств материала поверхностного слоя;

возможность осуществления повторных проходов индентора по одному участку поверхности позволяет оценить свойства изучаемого материала при накоплении повреждений в режиме малоциклового усталости.

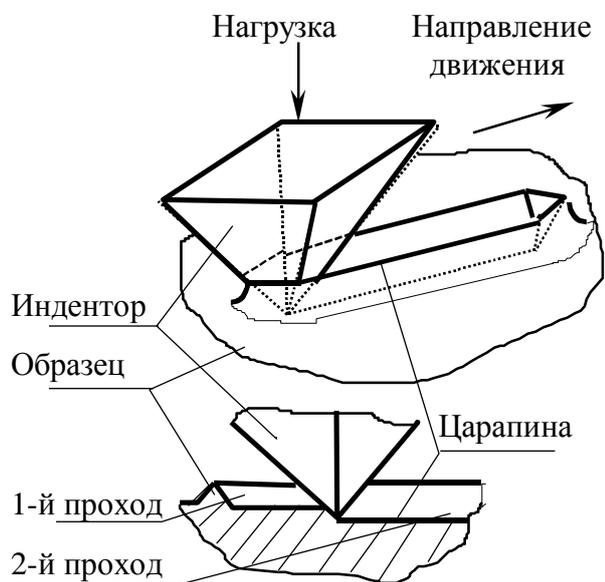
При изучении материала модифицированного поверхностного слоя необходимо учитывать, что он включает структурные элементы различного масштаба: атомы, нуль- и одномерные дефекты - на микроуровне; дислокационные ячейки, клубки, зерна - на мезоуровне; топографию и зеренную структуру - на макроуровне. Воздействие индентора вызывает пластическую деформацию поверхностного слоя на микро- и мезоуровнях. Объективность оценки активационных характеристик достигается при условии, что деформируемая область включает множество различных структурных элементов, что позволяет при выполнении эксперимента усреднить влияние всех действующих механизмов. Это соответствует структурно-феноменологическому подходу, при котором энергия активации может быть рассмотрена как полная энергия, затраченная на активацию совокупности всех механизмов повреждения, которые на мезо- и макроуровнях вызывают пластическую неустойчивость и оттеснение вещества поверхностного слоя количеством в один моль. При этом совокупность действующих механизмов полагается заранее неизвестной и представляется в виде «черного ящика». Оценке подлежат только входные параметры в виде затрачиваемой механической энергии и выходные в виде результирующего количества оттесненного вещества.

Для реализации способа склерометрии существуют специальные приборы - склерометры, исполнение которых, в зависимости от цели проводимых исследований, может быть весьма многообразным. В настоящее время отсутствует стандартное оборудование для склерометрических испытаний. Однако для оценки



Р и с. 3.17. Диаграмма режимов царапания:
 D_p - степень внедрения твердого выступа;
 α - угол атаки; f - касательные напряжения на поверхности контакта

энергии активации разрушения поверхностного слоя можно воспользоваться стандартным микротвердомером ПМТ-3. Царапание осуществляется за счет горизонтального перемещения столика с закрепленным образцом относительно неподвижного индентора, опущенного на поверхность образца (рис. 3.18, 3.19). Нагружение индентора производится при помощи стандартных навесок массой $2 \div 200$ г. Размеры борозды определяются при помощи оптического микрометра.



Р и с. 3.18. Царапание поверхностного слоя индентором Виккерса

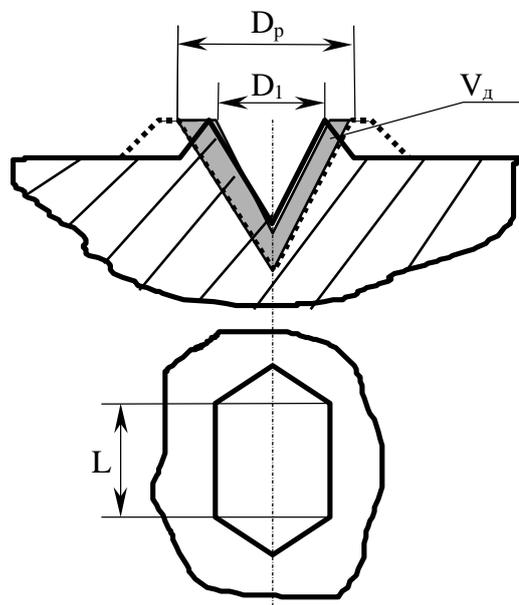


Рис. 3.19. Схема борозды

Выбор микротвердомера ПМТ-3 в качестве склерометра обоснован следующим:

прибор позволяет производить выбор места, глубины, направления и скорости царапания исследуемой поверхности без существенных ограничений;

благодаря углу при вершине индентора 136° царапины образуются в режиме пластической деформации, без микрорезания поверхностного слоя;

материал индентора (алмаз) долговечен и позволяет исключить образование наростов при царапании поверхности;

получаемые отпечатки имеют правильную призматическую форму, что позволяет без труда производить расчет вытесненного объема;

имеется возможность создания возвратно-поступательного движения столика за счет вращения ручного маховика, что позволяет производить циклическое деформирование материала поверхностного слоя с произвольным числом повторных проходов индентора.

При использовании метода склерометрии в качестве механического способа отеснения поверхностного слоя энергия активации разрушения может оцениваться из отношения

$$U_0 = \frac{W_{\text{царап}}}{V_{\text{деф}}}, \quad (3.25)$$

где $W_{\text{царап}}$ - механическая энергия, затраченная на царапание, кДж; $V_{\text{деф}}$ - количество активированного материала, моль.

Данное предположение может считаться справедливым при малых скоростях царапания <0.01 м/с, при которых можно пренебречь гидродинамическими свойствами пленок смазочных материалов, нанесенных на поверхность образца, саморазогревом поверхности образца в зоне контакта с индентором, а также влиянием скорости царапания на количество деформируемого вещества.

Выражение для расчета работы, затраченной на пропахивание канавки, имеет вид

$$W_{\text{царап}} = N \cdot f \cdot L \cdot \cos \alpha \cdot 10^3, \quad (3.26)$$

где N - нормальная нагрузка на индентор, Н; f - коэффициент сопротивления царапания; L - путь трения (длина канавки), мкм; α - угол между векторами силы и скорости при царапании поверхностного слоя. Параметр α необходимо учитывать, поскольку материал поверхностного слоя является анизотропным. При этом деформация материала, преимущественно осуществляемая за счет механизма скольжения дислокаций, происходит в направлении, обусловленном ориентацией кристаллографических плоскостей металлических зерен. Оси главных напряжений в деформируемом материале поверхностного слоя вытягиваются вдоль направления сопротивления движению, поэтому можно принять $\cos \alpha = 1$ при царапании исследуемой поверхности вдоль образовавшейся текстуры ($\alpha = 0^\circ$), а также при ее поперечной деформации.

В процессе трения материал поверхностного слоя претерпевает многократную пластическую деформацию, что в конечном итоге приводит к исчерпанию запаса пластичности и охрупчиванию. Исследования метода склерометрии показали, что при многократных проходах индентора по одной борозде объем материала, вытесняемого при каждом проходе (за исключением первого), является одинаковым. При первом проходе вытесняемый индентором объем всегда оказывается больше, чем при втором и последующих проходах, что объясняется отличием деформации при первичном и последующем образовании борозды. Первичную борозду формируют «холмики», вырастающие по краям канавки. Последующее увеличение борозды при новых проходах происходит путем повторной деформации этих холмов и оттеснением наружу (см. рис. 3.19), подобно разрушению поверхностного слоя при трении, обусловленному малоциклового усталостью при многократной пластической деформации «холмов». По этой причине объем борозды, полученной после первого прохода индентора, в анализе не учитывается.

При осуществлении многократных проходов индентора по исследуемой поверхности, среднее значение объема, вытесняемого за один проход, определяется как отношение полученного объема борозды к числу сделанных проходов. Объем борозды определяют исходя из ее геометрических характеристик: ширины D и длины L . Принимая, что глубина внедрения индентора $h_{\text{вн}}$ связана с шириной ца-

рапины соотношением $h_{\text{вн}} \cong 0,14 \cdot D$, и используя для расчета площади поперечного сечения борозды формулу площади треугольника $S_{\Delta} = 1/2 \cdot h_{\text{вн}} \cdot D = 0,07 \cdot D^2$ выражение для расчета количества вытесненного материала с учетом размерности примет вид:

$$V_{\text{деф}} = \frac{D_n^2 - D_1^2 \cdot L \cdot 0,07}{P - 1 \cdot V_M} \cdot 10^3, \quad (3.27)$$

где V_M - молярный объем металла, мм³/моль; P - число проходов индентора; D_1 и D_n - ширина борозды соответственно после 1 и P проходов индентора, мкм.

С учетом выражений (3.26-3.27) формула для расчета энергии активации примет следующий вид:

$$U_0 = \frac{14,286 \cdot V_M \cdot P - 1 \cdot N \cdot f}{D_n^2 - D_1^2}. \quad (3.28)$$

Чтобы получить корректную оценку энергии активации при использовании полученного выражения необходимо обосновать выбор параметров P и N , а также оценить значения f , V_M , D_1 и D_n .

Ширину канавки можно оценить различными экспериментальными методами: измерением при помощи оптических приборов, путем снятия профилограммы щуповым прибором, сканированием поверхности на электронном микроскопе и др. Достаточную точность измерения ширины борозд позволяет получить оптический метод, реализованный на базе оптического микрометра ОМО (ГОСТ 7513-55), которыми снабжены микротвердомеры типа ПМТ-3. В этом случае образец необходимо установить таким образом, чтобы одна из неподвижных рисок на шкале микрометра легла вдоль одного края борозды, а подвижная риска - вдоль противоположного края. Увеличение микроскопа должно быть выбрано согласно требуемой точности измерения. Как показали эксперименты, для царапин глубиной в единицы и шириной в десятки микрон достаточную точность замеров можно получить при погрешности $\pm 0,4$ мкм/дел, что соответствует увеличению окуляра 15^x . Данный способ отличают малая трудоемкость, достаточная точность получаемых результатов, а также возможность игнорирования участков борозды со случайными дефектами поверхности, что особенно важно при исследовании приработанной поверхности. Недостатком метода является элемент субъективности при измерениях, когда точность результата связана с квалификацией экспериментатора.

При скольжении индентора по поверхности образца реализуется пластическое отеснение материала. В случае, когда нормальные нагрузки на фактических площадях контакта близки к твердости материала, Боуден и Тейбор предложили использовать следующую зависимость, связывающую касательные и нормальные напряжения:

$$k = \frac{H_{\mu}}{3 \cdot \sqrt{3}}, \quad (3.29)$$

где k - касательное напряжение деформирования материала; H_{μ} - микротвердость. Из уравнения следует, что коэффициент сопротивления царапанию пластического трения близок к величине $1/\sqrt{3} \approx 0,2$. Таким образом, при расчете энергии, затраченной на пластическую деформацию поверхностного слоя наиболее часто применяемых конструкционных материалов, коэффициент f можно считать постоянным, равным 0,2.

Молярный объем для чистых металлов рассчитывается по величине их атомной массы M и плотности ρ по формуле

$$V_M = \frac{M}{\rho} \times 10^3. \quad (3.30)$$

Для сплавов молярный объем определяется исходя из процентного содержания примесей по формуле

$$V_M = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n V_{M_i} \cdot C_i, \quad (3.31)$$

где n - количество элементов в сплаве; V_{M_i} - молярный объем i -того элемента, рассчитываемый по (3.30); C_i - концентрация i -того элемента, % мас.

В процессе трения происходит текстурирование поверхностного слоя, что, однако, не вызывает качественного изменения свойств и кристаллического строения материала. Тепловое расширение - дилатация при пластической деформации не превышает сотых долей процента. Поскольку модифицированный со стороны свободной поверхности тонкий слой имеет размеры порядка $0,2 \div 3,0$ нм, что значительно меньше толщины исследуемого слоя $0,1 \div 3,0$ мкм, можно также считать, что модифицированное состояние не оказывает существенного влияния на оценки величины V_M . Поэтому расчетная формула (3.31) применима в случае модифицированной поверхности.

Табличные значения величины атомной массы M и плотности ρ для ряда металлов и сплавов, их элементный состав, а также рассчитанные значения V_M приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3.

Молярный объем некоторых металлов и сплавов

Материал	Атомная масса M	Плотность ρ , $10^3 \cdot \text{кг/м}^3$	Молярный объем M , $\text{мм}^3/\text{моль}$
Медь	63,564	8,96	7094
Алюминий	26,982	2,6889	10035
Железо	55,847	7,874	7093
Титан	47,90	4,505	10633
Никель	58,70	8,91	6588
Магний	24,305	1,738	13984
Хром	51,996	7,18÷7,20	~7222
Сталь легированная	-	7,77÷7,85	~7160

Латунь	-	8,2÷8,85	~7999
Бронза	-	7,5÷9,1	~9464

Чтобы оценить деформационные характеристики материала в режиме малоциклового усталости, число проходов должно быть больше двух. Первый проход индентора служит только для создания базовой борозды, относительно которой рассчитывается объем материала, вытесненного при последующих проходах (см. рис. 3.19). Поэтому объем исходной борозды в дальнейшем исключается из рассмотрения.

С увеличением числа проходов происходит рост борозды и возрастает площадь упругого контакта граней индентора с поверхностью царапины. Если число проходов превысит некоторое критическое значение $P_{кр}$, пластический характер контактирования сменится упругим, а пластическое трение сменится смешанным. При экспериментальных исследованиях было установлено, что данный переход имеет резко выраженный характер. Для гарантированного обеспечения точки бифуркации материала поверхностного слоя при механическом воздействии число проходов индентора не должно превышать $P_{кр}$. Критерий выбора оптимального числа проходов индентора имеет вид

$$2 < P_{опт} < P_{кр}. \quad (3.32)$$

Величина $P_{кр}$ для каждого материала требует экспериментальной оценки.

При выборе оптимального числа проходов желательно использовать значения, близкие к $P_{кр}$. Это дает возможность объективной оценки среднего количества активируемого материала. Многочисленные эксперименты показали, что для испытанных конструкционных металлов и сплавов диапазон оптимального числа проходов индентора находится в пределах 3÷5.

Нагрузка, действующая на индентор, влияет на глубину деформируемого слоя. Для объективной оценки энергии активации величину нагрузки следует выбирать исходя из твердости материала и толщины модифицированного слоя. Оптимальной является максимальная нагрузка, при которой глубина царапины не превышает толщины debris - слоя. Поэтому выбор N осуществляется на основании эксперимента.

В результате проведенных исследований была получена табл. 3.4, в которой указаны рекомендуемые значения N для различных материалов.

Таблица 3.4.

Оптимальные нагрузки на индентор

Испытываемый материал	Рекомендуемая масса груза, Г	Характерная глубина исследуемого слоя, мкм
Покрyтия	15÷20	0,5
Цветные металлы	30	1÷3
Нецветные металлы, стали и сплавы	50	1÷3

Наиболее сложной активационной характеристикой для физического толкова-

ния является структурно-чувствительный коэффициент γ . Ранее этот коэффициент рассматривался как подгоночный параметр, связывающий величину энергии активации с действующим напряжением. В других работах физический смысл γ интерпретировался согласно его размерности как активационный микрообъем, подверженный действию термической флуктуации. Кроме того, существуют работы, в которых при изучении кинетики деформации этот коэффициент не рассматривается вовсе. В настоящее время принято считать, что структурно-чувствительный коэффициент характеризует состояние материала поверхности, полученное в результате воздействия на нее физико-химических и механических факторов (термообработки, наклепа, смазки и т.д.).

В приведенной методике оценки энергии активации при механическом воздействии на материал поверхностного слоя контактные давления близки к твердости, поэтому при условии $\Delta G=0$ коэффициент γ можно определить непосредственно из выражения

$$\gamma = \frac{U_0}{H_\mu}, \quad (3.33)$$

поскольку в условиях данной методики $\sigma \cong H_\mu$.

Описание методики оценки активационных параметров

Методика испытания материалов включает следующие этапы: подготовку образцов; выбор оптимальных режимов испытания (нагрузка, температура образцов, среда и т.д.); выполнение операции склерометрии в заданном режиме; оценка деформационных характеристик царапин и расчет энергии активации U_0 ; оценка микротвердости поверхности H_μ и расчет структурно-чувствительного коэффициента γ .

Подготовка образцов

Для получения адекватных значений активационных параметров материал и состояние поверхностного слоя испытуемого образца должны быть аналогичны тому, которое образуется в реальных условиях.

С учетом того, что приработка материала в эксплуатации является трудоемким и дорогостоящим мероприятием, на этапе проектирования можно использовать лабораторные методы испытания образцов при помощи стандартных испытательных стендов: трибометров и машин трения. При этом должно быть соблюдено физическое подобие режима лабораторных испытаний с работой пары трения в эксплуатации.

В разработанном способе оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя вначале выполняется анализ режимов работы интересующей пары трения, на основе которого производят выбор материала и вида его обработки; схемы установки для испытаний (палец-диск, плоскость-плоскость, шар-

плоскость и т.д.); условий трения (среда, вид смазки, давление, температура и т.д.); вида нагружения (знакопеременный, знакопостоянный). После этого производят приработку образцов на соответствующих машинах трения при действии заданного рабочего режима. Испытания образца на выбранной машине трения в заданном режиме нагружения, смазки и т.п. продолжается до завершения прирабочного этапа и наступления установившегося процесса изнашивания.

Учитывая, что в процессе приработки испытуемого образца необратимой модификации подвергается только тонкий поверхностный слой, имеется возможность многократного использования одних и тех же образцов. Для этого после цикла проведенных испытаний нужно восстановить исходные характеристики материала поверхностного слоя за счет удаления модифицированного слоя. Это можно сделать механическим способом (шлифование) или химическим травлением. Удаление с поверхности образца слоя толщиной в несколько микрометров не изменяет значительно его геометрические размеры, поэтому такой способ исследований пригоден и в том случае, когда испытуемым образцом является изделие.

Выбор оптимальных режимов исследования

При длительной работе узла трения на поверхностях устанавливается определенная температура. Для многих машин, в частности транспортных средств, характерной является эксплуатация в нескольких режимах и при различных температурах внешней среды (зимний, летний сезоны). Чтобы учесть эти факторы и оценить возможные изменения активационных характеристик на разных стадиях эксплуатации, необходимо проводить испытания образцов в некотором ожидаемом диапазоне изменения рабочих температур. Требуемая температура образцов задается и поддерживается при помощи нагревательного устройства, снабженного датчиком и терморегулятором. Эксперименты можно выполнять при фиксированной температуре или при ряде значений температуры при нагреве и термостабилизации образцов.

Перед выполнением царапин на испытуемую поверхность необходимо нанести пленку смазочного материала, в среде которого происходила приработка. Учитывая, что металлическая поверхность является катализатором, смазка должна наноситься непосредственно перед экспериментом.

Испытания и расчет активационных параметров U_0 и γ

Подготовленный образец закрепляют на нагревательном устройстве и устанавливают на столике микротвердомера так, чтобы испытуемая поверхность расположилась под индентором на расстоянии 1÷3 мм (при поднятом инденторе). Поворачивая маховик перемещения столика микротвердомера устанавливают направление перемещения образца относительно индентора и разворачивают образец таким образом, чтобы это направление совпадало с направлением трения поверхности при приработке. После этого на поверхность наносят смазку. Как показали экспериментальные исследования, толщина слоя смазки не влияет на полу-

чаемые результаты.

После нагрева образца до требуемой температуры опускают индентор и склерометрируют, поворачивая маховик перемещения столика микротвердомера. Для удобства измерения первичной и конечной ширины царапин вначале делают первичную царапину длиной не менее 0,2 мм. Затем индентор поднимают и через 0,1 мм по траверзе 1-й царапины делают вторую, на которой уже выполняют n проходов. Повторные проходы получают вращением маховика в противоположную сторону. Таким образом, используя возвратно-поступательное смещение столика, делают 5 проходов индентора по одному и тому же участку исследуемой поверхности. Для получения оценки с учетом рассеяния измерений аналогичным образом выполняют не менее трех царапин при однократном и многократном проходах индентора.

После нанесения всей серии царапин производят измерение их ширины и статистическую обработку.

По результатам обработки измерений рассчитывают значения энергии активации U_0 и структурно - чувствительного коэффициента γ , используя формулы (3.28) и (3.33).

Статистический анализ экспериментальных данных показал, что рассеяние размеров борозд, полученных при равных условиях, подчиняется нормальному закону распределения. Для достижения необходимой точности расчетов U_0 минимальная серия должна включать испытания не менее 3 – 5 образцов.

Таблица 3.5.

Энергия активации разрушения поверхностного слоя конструкционных металлов

Материал	Диапазон значений энергии активации, кДж/моль
Сталь 40Х	41 ÷ 120
Сталь ШХ-15	72 ÷ 150
Бронза БрАЖН 10-4-4	24 ÷ 86
Латунь Л40	23 ÷ 85
Алюминий	6 ÷ 11
Медь	10 ÷ 45
Твердый сплав ВК8	108 ÷ 155

В табл. 3.5 приведены наиболее характерные значения энергии активации для ряда конструкционных материалов, установленные с помощью метода склерометрии.

4.11. Применение склерометрии для оценки энергии активации термомеханической деструкции смазочных материалов

Тонкая пленка масла ведет себя подобно многослойному кристаллическому образованию высокой упругости, способному выдерживать без разрушения

большие нормальные давления. Однако существуют условия, при которых смазка не способна защищать поверхности от непосредственного контакта вследствие десорбции или деструкции молекул смазочного вещества под влиянием термических и механических воздействий. Деструкция молекул проявляется не только при эксплуатации, но и при хранении смазочных материалов. Поскольку молекула является носителем свойств вещества, процесс разложения способен повлечь изменение физических и химических свойств смазочной среды.

Деструкция является кинетическим процессом и, следовательно, может происходить по термофлуктуационному механизму при термическом, механическом и термомеханическом воздействии. В связи с этим наиболее благоприятные условия для деструкции смазочных материалов создаются в зоне фактических пятен контакта, где нагрузки и температуры при трении максимальны. Кроме того, деструкция смазочных материалов при трении стимулируется каталитическим действием воды и металлов, с которыми соприкасается масло, и быстро прогрессирует с повышением температуры.

Следствием деструкции молекул смазочного материала является образование активных свободных радикалов, которые могут вступать в химическое взаимодействие с металлической поверхностью и кислородом, растворенным в смазочной среде. Последнее приводит к окислению масла и образованию лаков и нагаров на трущихся поверхностях. В результате окисления масла изменяется его вязкость, плотность, ухудшается деэмульгирующая способность, образуются растворимые в масле и летучие кислые продукты, обуславливающие коррозионную агрессивность масла, плотные продукты окисления выпадают в осадок. Появление осадка в масле приводит к его потемнению, а продукты окисления служат катализаторами старения масла. При добавлении в использованное масло нового процесс старения ускоряется.

Мерой эксплуатационной прочности молекул смазочных материалов может служить величина энергии активации деструкции смазочных материалов.

Существует связь между напряженным и структурным состояниями смазочного материала в объеме и в граничном слое, контактирующем с металлической поверхностью, где смазочный материал определенным образом организуется: приобретает кристаллическую структуру, происходит ориентация полярных молекул, что вызовет напряженное состояние молекул смазочного материала. Поэтому для реальной оценки прочности пленки смазочного материала процесс деструкции необходимо исследовать на поверхности металлического образца.

Для оценки энергии активации деструкции смазочных материалов учитывается принцип Ле Шателье-Брауна или принцип наименьшего принуждения, определяющего условия стабильности термодинамической системы. Он формулируется следующим образом: в любой системе, находящейся в равновесном состоянии, всякое изменение параметра, выводящее систему из равновесия, сопровождается такими изменениями, которые стремятся свести на нет возмущающее изменение параметра.

Из этого следует, что если на металлической поверхности вызвать разрушение смазочного материала, находившегося до этого в состоянии динамического рав-

новесия с материалом поверхностного слоя, то, стремясь сохранить равновесный баланс, материал поверхностного слоя должен отреагировать повышением внутренней энергии на ту же величину, которая высвобождается при деструкции молекул смазочного материала за счет взаимодействия поверхности с активными радикалами.

Как оказалось, действительно, в ходе деструкции смазки при трении на контактирующих поверхностях происходит реакция активных центров (ион-радикалов) металла с продуктами распада молекул смазочных материалов, что модифицирует материал поверхностного слоя и изменяет его энергию активации.

Таким образом, энергию активации деструкции смазочных материалов $U_0^{см}$ можно оценить как абсолютную разность между значениями энергии активации разрушения немодифицированного U_0 и модифицированного $U_0^{мод}$ материала поверхностного слоя металлического образца:

$$U_0^{см} = U_0^{мод} - U_0. \quad (3.34)$$

Энергия активации разрушения материала поверхностного слоя U_0 до химической модификации и $U_0^{мод}$ после его модификации определяется по методике, изложенной выше. Долговечность смазочных материалов оценивается по величине энергии активации деструкции: чем выше энергия, тем труднее активируется процесс деструкции молекул и, следовательно, долговечнее смазочный материал.

Так как деструкция молекул происходит по механизму бифуркации, то данный процесс инвариантен к виду подводимой энергии. Поэтому для активации деструкции можно использовать не только механическое, но и термическое воздействия. В первом случае модификацию поверхностного слоя можно производить в процессе трения поверхностей при введении в зазор испытуемого смазочного материала. Во втором - модификацию поверхности можно выполнять путем нагрева металлического образца с нанесенным на его поверхность слоем испытываемого смазочного материала до температуры химической модификации.

Таблица 3.6.

Энергия активации деструкции смазочных материалов

Масло	Энергия активации, кДж/моль	
	Сталь 45Х	Сталь ШХ-15
Без модификации	100	192
Т-30	10.8	10.9
ТП-22С	15.81	14.06
Geaftex EP-C	15.81	16.92
M8V1	18.39	19.86
M10Г ₂ К	29.89	28.46
M63/12Г ₁	33.6	34.25
Супер-Т	22.2	21.77
Neste MP	35.16	34.3
Shevron-RPN	32.1	29.97

ТАД-17И	45.33	45.4
И-12А	58.34	55.07
И-40	48.67	48.11

Проведенные исследования значений энергии активации деструкции различных смазочных материалов при термическом воздействии показали, что их значения составляют десятки килоджоулей на моль (см. табл. 3.6). Данный порядок соответствует слабейшим ковалентным связям в молекуле смазочного материала, которые в первую очередь подвергаются разрушению.

Заключение

В данной главе изложены сведения о строении и свойствах конструкционных материалов, дефектах структуры и их влиянии на физико-механические свойства поверхностей. Особое внимание уделено механизмам, влияющим на состояние и свойства поверхностного слоя. Процессы передеформирования и разрушения материалов поверхностных слоев рассмотрены с привлечением представлений молекулярно-кинетической теории прочности. Описаны методы определения основных активационных параметров - энергии активации и структурно-чувствительного параметра. Показано, что наиболее перспективным для практических целей оценки механических характеристик поверхностей является метод склерометрирования, который помимо активационных характеристик поверхностей трения позволяет оценить энергию активации деструкции смазочных масел, а следовательно, их качество.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
2. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Л.: Химия, 1972. 240 с.
3. Бершадский Л.И. Масштабное переупорядочение структуры и энтропийные эффекты при трении и износе металлов//Физика износостойкости поверхности металлов. Л., 1988. С. 166-182.
4. Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. М.: Наука, 1979. 344 с.
5. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания. Трение и износ. 1997. Т. 18. № 1.
6. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Metallurgy, 1978. 647 с.
7. Журков С.Н. Проблема прочности твердых тел// Вестн. АН СССР. 1957. № 11.
8. Иванова В.С. и др. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 384 с.
9. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. М.: Metallurgy, 1976. 176 с.
10. Машков Ю.К. Трибология конструкционных материалов. Омск, 1996. 298 с.

11. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
12. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент: Фан, 1979. 168 с.
13. Пат. 2119165 С1 РФ, МКИ 6 G 01 N 33/30. Способ оценки энергии активации термомеханической деструкции смазочных материалов при трении / Д.Г. Громаковский, Е.В. Беленьких, И.Д. Ибатуллин, А.С. Карпов, А.Г. Ковшов, А.Н. Сорокин, Л.В. Кудюров (РФ), Э. Торренс (Ирландия). 97101152/04; Заявлено 23.01.97; Опубл. 20.09.98, Бюл. № __, Приоритет __, № __. __с. УДК __.

Глава 4

ИЗНАШИВАНИЕ

В главе изложены современные представления трибологии о физических процессах протекающих в материале поверхностного слоя под действием трения, ведущих к его разрушению.

1.10. 4.1. Основные характеристики и виды изнашивания

Относительные перемещения контактирующих поверхностей и их механические взаимодействия приводят не только к изменениям состояния и свойств материалов поверхностных слоев, как это отмечалось в гл. 2, но и к их разрушению.

Обычно разрушение происходит в форме отделения от поверхностей трения мелких частиц материала, что приводит с течением времени к изменению размеров и формы контактирующих деталей. Это явление и называют изнашиванием.

Следует иметь в виду, что изнашивание является сложным многоуровневым процессом.

Основным инициатором изнашивания является деформация материала контактирующих поверхностей под действием контактных напряжений и температурные флуктуации. Их следствием является накопление дефектов структуры с концентрацией в поверхностном слое: текстурирование материала в направлении скольжения; химические реакции материала пары с активными компонентами среды; перенос вещества с поверхности трения в глубину, либо обратно, и обмен веществом контактирующих тел и т.д.

Основные понятия, термины и определения в области изнашивания регламентированы ГОСТ 23.002-78. В частности, по этому ГОСТУ результат изнашивания определен термином **износ**.

Величину износа определяют в единицах длины, объема, массы, а износ за единицу времени - как **скорость изнашивания**, м/ч:

$$J = \Delta h / t,$$

где Δh - величина износа, (линейный износ) или толщина удаленного слоя, м;
 t - время, ч.

Широко распространена другая характеристика изнашивания - **интенсивность изнашивания**:

$$J = \frac{\Delta h}{L} \quad (\text{безразмерная величина}),$$

где Δh - величина износа, м, а L - путь трения, м.

Представление о характере изнашивания можно получить из краткого обзора основных разновидностей изнашивания. Их описание предварим следующим замечанием. В трибологии принято за основу классификации видов изнашивания принимать отчетливо наблюдаемый или иным образом установленный преобладающий вид разрушения поверхностей трения.

1.11. Усталостное изнашивание

К усталостному изнашиванию относят случаи, когда при работе узлов трения отсутствуют аномальные повреждения (схватывания, задиры, микрорезание, прижоги поверхностей и т.п.), трение протекает в нормальных условиях, имеется смазка, но тем не менее вследствие трения материал поверхностного слоя «устает» и начинает отделяться в виде частиц износа. Здесь как бы проводится аналогия с понятием «усталостная прочность».

Различают усталостное изнашивание двух видов: многоцикловое и малоцикловое. Многоцикловое изнашивание возникает при упругом контактировании. Многократное воздействие на микровыступ приводит к постепенному накоплению микродефектов, образованию микротрещин, при слиянии которых образуются поверхностные макротрещины, вызывающие разрушение материала и отделение частиц износа. При малоцикловом изнашивании совместное действие нормальной и касательной нагрузок при трении приводит к тому, что максимальное касательное напряжение возникает не на поверхности, а под пятном контакта на небольшой глубине, где накапливаются повреждения и образуются трещины. У хрупкого материала трещина возникает на поверхности. Малоцикловое изнашивание наблюдается при пластическом деформировании поверхностей (без резания) более мягкого материала выступами более твердого. В местах такого деформирования нередко образуются боковые навалы, которые при последующих проходах тоже могут отделяться в виде продуктов износа.

Особым проявлением многоциклового изнашивания является так называемый питтинг (англ. pit - углубление), возникающий на дорожках качения подшипников при пульсации нагрузки.

Питтинг возникает в результате многократного деформирования поверхностей, нагружаемых телами качения. Язвы питтинга часто называют выкрашиванием. Кроме подшипников и направляющих качения, такой износ характерен для зубьев шестерен, шлицевых соединений и ряда других контактных пар.

1.12. Абразивное изнашивание

Абразивные частицы производят на поверхностях трения разрушительное действие в двух основных формах. Острые абразивные частицы царапают, совершают хаотический процесс микрорезания, что наблюдается, например, при работе почвообрабатывающих или горных машин.

Второй характерный механизм изнашивания - деформационное действие «тупых» абразивных частиц, которые не царапают, а выдавливают лунки или бороздки и вызывают при многократном повторении локальные усталостные разрушения.

Еще одной разновидностью абразивного износа является **гидроабразивный износ**. Гидро- и газоабразивный износ возникает при действии на поверхность потоков газа или жидкости, содержащих частицы абразива.

При отсутствии абразивных частиц в струях жидкостей или газов наблюдается **эрозионный износ**.

К данной разновидности изнашивания близок **кавитационный износ**. Кавитационный износ возникает, когда жидкость обтекает края препятствий, например лопаток насосов, турбин. На краях препятствий резко изменяется скорость течения, образуются разрывы в кавитационные образования, заполненные паром, которые, захлопываясь создают ударные волны. Многократное ударное воздействие расшатывает кристаллы металлической поверхности, которые через некоторое время выкрашиваются.

1.13. Коррозионно-механическое изнашивание

К такой разновидности изнашивания относят окислительный износ, фреттинг-коррозию и водородный износ. Окислительный износ связан с активацией окислительных процессов поверхностных слоев трущихся поверхностей за счет пластической деформации, повышенной температуры, действия циклических нагрузок и наличия кислорода в смазке и окружающей среде.

При окислительном изнашивании вначале, когда пленки окислов тонки (порядка долей микрометра) и эластичны, они играют положительную роль и предохраняют поверхности от повреждений. Но по мере роста они становятся толстыми, хрупкими и разрушаются при нагрузках, которые вначале легко переносили. Продукты износа уносятся со смазкой. Тем временем окислительный процесс продолжается, пленки снова нарастают и защищают от износа основной материал. Таким образом, окислительное изнашивание - это процесс, при котором разрушается не материал изнашиваемой детали, а его вторичные структуры - оксиды, образующиеся в процессе трения.

Самой агрессивной формой окислительного износа является фреттинг-коррозия (англ. Fret - разъедать). Фреттинг-коррозия обычно наблюдается в номинально неподвижных соединениях, подверженных вибрации. При фреттинг-коррозии циклические микроперемещения в контакте вызывают локальные тепловые флуктуации, многократное пластическое деформирование, интенсивное накопление дефектов структуры, образование микро- и макротрещин, по которым в глубину от поверхностей диффундирует кислород и другие активные компоненты среды. Отделившиеся частицы абразивно воздействуют на поверхность. Характерные объекты подобного изнашивания - замки лопаток различных турбин, резьбовые соединения и другие детали машин, работающие в динамически напряженных условиях.

1.14. Водородное изнашивание

Водородный износ наблюдают в резьбовых соединениях, золотниковых и плунжерных парах, тормозных дисках и других узлах трения.

Водород в парах трения образуется в атомарной форме при электрохимико-термическом разложении воды, смазок, пластмасс. Такой водород по микродефектам материала диффундирует в поверхностный слой. При этом металлические связи заменяются слабыми водородными, а материал охрупчивается.

Водородное изнашивание впервые было открыто и исследовано российскими трибологами Гаркуновым Д.Н. и Поляковым А.А.

Известна еще одна весьма своеобразная разновидность изнашивания, при которой напротив наблюдается аномально низкий износ деталей. Этот вид износа условно называют **безызносностью** или избирательным переносом. Избирательный перенос также открыт российскими трибологами И.В. Крагельским и Д.Н. Гаркуновым в 1963 г. при исследовании пар трения скольжения «сталь-медные сплавы», смазываемых глицерином.

При трении в таких парах на стальной поверхности возникает мягкий, близкий к аморфному состоянию слой меди. При этом в процессе трения происходит взаимный, непрекращающийся перенос атомов меди с одной поверхности на другую, а пленка меди на стали постоянно возобновляется. Возможен и другой вариант, когда обе трущиеся детали стальные, но в системе машины имеются детали из медных сплавов, не участвующие в трении. Кислоты, возникающие в смазке в ходе ее термического распада, растворяют медный сплав, причем ионы меди оседают на обеих стальных поверхностях, образуя защитные пленки. В третьем случае в смазку вводят коллоидный раствор частиц, необходимых для образования защитных пленок. Избирательный перенос обеспечивает многолетнюю эксплуатацию узлов трения без заметного изнашивания. В таком режиме, например, работают компрессоры бытовых холодильников. Имеется положительный опыт создания режима избирательного переноса в ДВС и других агрегатах и узлах трения автомобилей.

Особый механизм изнашивания проявляется у резин. Обладая низким модулем упругости, резины способны к высокой относительной упругой деформации в 100% и более. Из-за высокого коэффициента трения элементы резиновой поверхности увлекаются контртелом, вытягиваются, отрываются и скручиваются, образуя продукты износа в виде окатышей.

Имеются и другие менее выраженные и специфические формы износа, которые интересны при узкой специализации.

Однако, несмотря на большую специфику, у всех видов изнашивания имеются общие закономерности.

Типичная характеристика износа во времени представлена на рис. 4.1.

Начальная часть кривой здесь характеризует период приработки ($t_{\text{прираб.}}$). Затем изнашивание протекает с постоянной скоростью ($t_{\text{прираб.}}$, $t_{\text{критич.}}$). Этот участок принято называть периодом нормальной эксплуатации. При $t > t_{\text{критич.}}$ износ резко возрастает, становится катастрофическим, что приводит к выходу узла трения из строя.

На этапе приработки формируются эксплуатационные свойства узла трения.

Сформировавшуюся к концу приработки шероховатость принято называть равновесной. Равновесная шероховатость связана с исходной, но её параметры главным образом определяются физико-механическими свойствами материалов деталей и смазки, а также характеристиками режима трения (нагрузка, скорость, температура и т.д.). При введении в эксплуатацию узлов трения после изготовления или капитального ремонта в технической документации тщательно оговариваются режимы приработки или обкатки, чтобы она прошла в кратчайший срок и создала благоприятные условия для длительной эксплуатации. Обычно также оговаривается и предельно допустимая величина износа (Δh_{\max}), определяющая ресурс всего узла трения или сменных деталей, например, вкладышей подшипников скольжения, подшипников качения, тормозных колодок и накладок.

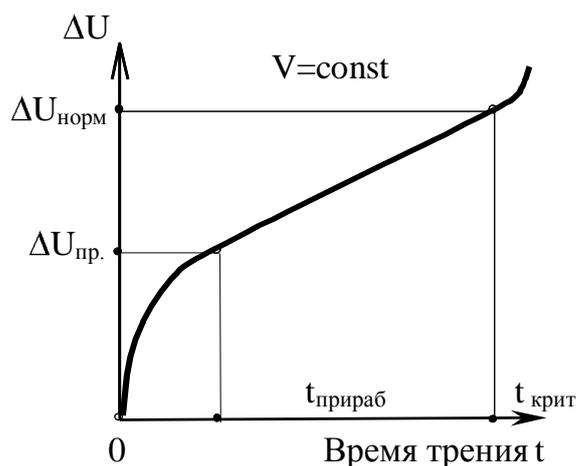
В заключение краткого обзора форм проявления изнашивания следует отметить, что в чистом виде каждый из отмеченных механизмов изнашивания практически не встречается, чаще всего преобладает ведущий механизм изнашивания и сопутствующие формы в зависимости от особенностей конструкции и условий работы узла трения.

Основным способом разрушения материала на поверхностях трения при всех видах изнашивания является образование и накопление повреждений в тонких поверхностных слоях материала. При этом наличие абразива, химических превращений или явления переноса может лишь изменять интенсивность разрушения либо в сторону ускорения, либо замедления.

Задача трибологии состоит в разработке средств и методов управления этими процессами или направленного уменьшения изнашивания, обеспечения высоких ресурсных характеристик узлов трения.

1.15. 4.2. Кинетическая интерпретация изнашивания

Престиж и полезный эффект любой машины или транспортного средства прежде всего составляют характеристики работоспособности, надежности и безопасности. Если безопасность транспортного средства во многом определяется прочностью элементов систем, механизмов и отдельных деталей, то при их оценке в категориях надежности возрастает значение и удельный вес ресурсных характеристик, определяемых конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами. Среди ресурсных характеристик важнейшее значение имеет изно-



Р и с. 4.1. Кривая износа

состоятельность деталей - сохранение ими размеров, формы и прочностных свойств в ходе эксплуатации.

При этом, в отличие от авиации, космических, сподвижных и тому подобных аппаратов, для транспортных машин, тоже имеющих напряженный динамический режим нагружения трущихся пар (ступицы колес, амортизаторы, подвеска, детали двигателя и др.), в конструкции используют относительно недорогие конструкционные материалы.

Тем не менее, во многих изделиях ведущих фирм по производству двигателей различного типа, ходовой части и других систем транспортных машин достигнуты высочайшие результаты, которые опираются на непрерывный поток внедрения новых идей, материалов и технологий.

Каков же багаж знаний, на который опираются создатели и производители машин и их узлов трения?

Современная точка зрения на физический механизм изнашивания при трении сложилась под влиянием исследований послевоенных лет. Наибольший вклад в научное понимание физики явлений изнашивания в СССР, а затем в России внесли такие ученые, как В.Д. Кузнецов, И.В. Крагельский, Б.И. Костецкий, А.С. Ахматов, Н.А. Буше, Н.Н. Давиденков, Ю.С. Терминасов, а за рубежом - Д. Арчард, Ф. Боуден, Д. Тейбор, Т. Куин и др.

Эти ученые впервые сопоставили износостойкость с ролью структурных факторов материалов в формировании физико-механических свойств поверхностей, обнаружили упрочнение и разупрочнение материала трением, отличие деформации зерен поликристаллических материалов на поверхностях трения и во внутреннем объеме и другие фундаментальные явления, определяющие изнашивание.

Наряду с инструментальными исследованиями (рентгеновские, оптические, электронно-микроскопические и другие методы изучения материала на свободных поверхностях) в тот же период происходит формирование теоретического подхода к изучению изнашивания на основе **теории дислокаций**.

В центре внимания этого подхода стоят проблемы структурно-энергетического истолкования зарождения, размножения и динамики движения точечных дефектов и дислокаций вблизи свободной поверхности твердого тела, действия локальных контактных температур и напряжений, вызываемых трением.

Общая картина выработанных представлений в этом подходе вкратце выглядит следующим образом.

При трении поле внешних напряжений и температурных флуктуаций изменяет химический потенциал точечных дефектов (вакансий, межузлий) и формирует их направленные диффузионные потоки, при движении которых образуются вакансионные петли, кластеры и другие формы дефектов, а скорость их движения усиливается под действием осмотических сил. В.П. Алехин назвал этот процесс диффузионной накачкой дефектов в поверхностные слои при трении.

Сама свободная поверхность при этом является областью облегченного зарождения и стока точечных дефектов и дислокаций.

Химические явления на поверхностях кристаллов (Т. Судзуки, Япония) усиливают поверхностные источники сдвига, а вблизи от свободной поверхности (И.Р.

Крамер, Англия) образуется барьерный слой с повышенной плотностью дислокаций, который задерживает движение дислокаций, генерируемых внутренними источниками. Этот слой назван debris - слоем (debris - англ. осколки, мусор, свалка).

Повышенная концентрация дислокаций вблизи поверхности деформируемого твердого тела (Л.М. Рыбакова и Л.И. Куксенова и др.) неизбежна ввиду образования большого количества гомогенных и гетерогенных источников. Эти источники генерируют не только большое число петель по сравнению с источниками в глубине от поверхности, но и обеспечивают их распространение на большие расстояния. Поскольку скорость их движения есть функция эффективного напряжения сдвига, она выше вблизи поверхности.

Еще один фактор существенно влияет на выход дислокаций и образование барьерного слоя. Этот фактор - сама поверхность, место стока микродефектов. Благодаря этому фактору вблизи свободной поверхности плотность дефектов минимальна, но она нарастает по мере удаления от свободной поверхности, что и является модельной схемой образования градиента плотности дефектов на некоторой глубине.

Физические факторы, действующие вблизи свободной поверхности и в тонком слое материала трущихся пар, сказываются на развитии всей совокупности физико-механических процессов.

Обрыв периодичности решетки вызывает изменения координации поверхностных атомов и молекул, порядка их расположения и межатомных расстояний. Повышенная активность усиливает физические и химические явления, протекающие при контактах с другими поверхностями и внешней средой.

Особенно усиливаются физическая адсорбция, диффузия, ускоряется образование вторичных структур и др.

Деформация трением создает в поверхностном слое запас избыточной энергии в виде нарушения сплошности или однородности материала. Одновременно усиливаются релаксационные процессы, обусловленные взаимодействием электронов друг с другом и с дефектами кристаллической решетки. Усиливаются все виды рассеяния энергии (механической, тепловой, фононное, электронное и др.), а неупорядочное движение атомов, линейных, точечных и других дефектов заменяется движением направленным. При этом движущиеся частицы или дефекты стремятся избавить тело от возникшей неравновесности и избыточной свободной энергии.

Трение интенсифицирует диффузионные потоки благодаря многократному повторению тепловых и силовых воздействий при встречах микронеровностей, создающих нестационарные поля с большим градиентом температур и давлений.

Диффузия и пластическая деформация инициируют фазовые превращения. Так, например, различные авторы экспериментально установили, что в поверхностном слое трущихся деталей из сталей количество углерода может возрасти от нескольких до 30 %. При этом возникают специфические структуры - аустенит и мартенсит трения.

Так, например, при схватывании (взрывной характер процесса) фаза аустенита возрастает до 90 %. На разных этапах приработки наблюдается также квазиобра-

тимый процесс перехода $\gamma \Leftrightarrow \alpha$ фаз. Характерно, что структурные и фазовые переходы имеют локальный характер и происходят в микроскопических объемах.

В то же время подробно исследована и взаимная диффузия материалов пар трения, которые взаимодействуют с материалом контрповерхностей, образуют в поверхностных слоях твердые растворы со своим элементным составом, периодом кристаллической решетки, плотностью дефектов и др.

1.16. 4.3. Термодинамическая интерпретация изнашивания

Важнейшим достоинством термодинамического подхода к оценке изнашивания является открываемая им возможность анализировать разнородные процессы с единой точки зрения.

Деформация трением протекает в условиях неоднородности механических напряжений, температур, химического потенциала, переноса энергии, вещества и импульса - фундаментальных превращений энергетического типа.

Процесс изнашивания в термодинамическом подходе относят к явлению массопереноса. Непосредственной причиной массопереноса является локальное изменение химического потенциала вещества и среды, а развитие массопереноса опирается на общие термодинамические законы, в частности на принцип Ле-Шателье, согласно которому всякое внешнее воздействие, выводящее систему из равновесия, инициирует в ней процессы, стремящиеся вернуть систему в исходное состояние.

Общим признаком превращений в трибосистемах является их необратимый характер, выражающийся в производстве энтропии.

Баланс энергии при трении с позиций термодинамического анализа можно представить в форме, отражающей первое и второе начала термодинамики:

$$\rho T dS = \rho dU - \sigma_{ik} \cdot \bar{d} \varepsilon_{ik} - Y_j dZ_j - A_k a_k, \quad (4.1)$$

где S и U - удельное значение энтропии и внутренней энергии материала; ρ и T - плотность и температура; σ_{ik} - тензор напряжений; ε_{ik} - тензор деформаций (упругих и пластических); Y_j и Z_j - локальные значения химического потенциала и концентрации компонент; A_k и a_k - обобщенные силы и координаты.

$$\rho \frac{\partial^i s}{\partial t} = \left\{ \rho \frac{\partial^i s}{\partial t} \right\}_b - \frac{q}{T^2} \text{grad } \varphi^{(e)} - \varphi - \left\{ \rho \frac{\partial^i s}{\partial t} \right\}_d, \quad (4.2)$$

где $\left\{ \rho \frac{\partial^i s}{\partial t} \right\}_b$ - диссипация механической энергии за счет вязкости материала;

$\frac{q}{T^2} \text{grad}(\varphi^{(e)} - \varphi)$ - поток тепла, плотность которого характеризует тензор теплопроводности $\lambda_{ik} = \lambda_{ki}$.

С учетом теплопроводности $q_i = -\lambda_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k}$ поток вещества (массоперенос) определяется с помощью химических потенциалов $(\phi_i - \phi)$, дающих значение избыточного локального химического потенциала данного компонента.

Плотность потока вещества имеет вид

$$j_i = \gamma_{ik} \frac{\partial \phi_i - \phi}{\partial x_k} \quad (4.3)$$

Здесь γ_{ik} - кинетический коэффициент массопереноса, $\gamma_{ik} \sim D_{ik}$, где D_{ik} - тензор самодиффузии.

Плотность потока тепла

$$q_i = -\lambda_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad (4.4)$$

где $\lambda_{ik} = \lambda_{ki}$ - тензор теплопроводности.

Из анализа изнашивания на основе положений термодинамики следует, что перенос вещества в термодинамической системе узлов трения опосредован плотностью потока теплообразования, диссипацией и химическим потенциалом элементов системы.

Механическая составляющая процесса разрушения в той же интерпретации может быть рассмотрена по схеме, предложенной А.А. Дубининым.

Упругая среда, в которой распространяется механическое воздействие, воспринимает их как продольные, поперечные и поверхностные волны, вызываемые как падающим, так и отраженным импульсом.

Мерой энергии волн является объемная плотность кинетической энергии среды

$$W_k = \frac{dW_n}{dV} = \frac{1}{2} \rho v_1^2, \quad (4.5)$$

а объемная плотность потенциальной энергии среды

$$W_n = \frac{dW_n}{dV} = \frac{1}{2} \rho v_2^2 \cdot \varepsilon, \quad (4.6)$$

где dW_k и dW_n - кинетическая и потенциальная энергии малых объемов среды dV ; ρ - плотность; v - фазовая скорость волн в среде; ε - относительная деформация.

Объемная плотность энергии воздействующих волн

$$W = W_k + W_n = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 + v_2^2 \varepsilon). \quad (4.7)$$

Поскольку объемная плотность энергии волн зависит от координат и времени, скорость переноса энергии волной равна скорости перемещения в пространстве при максимальной объемной плотности энергии волны.

При оценке изнашивания необходимо учитывать необратимый характер деформации трением, для чего используют характеристики термодинамической вероятности происходящих событий.

И. Пригожин рекомендовал для этого формулу вероятности состояния системы Эйнштейна:

$$\omega \approx \exp \frac{S - S^*}{K}, \quad (4.8)$$

где S^* - значение энтропии в состоянии равновесия, а K - константа Больцмана.

При воздействии на систему образуется диссипативный поток рассеяния J_s . Если $\frac{\partial S}{\partial \tau}$ - производная энтропии, а τ - время релаксации, то

$$\frac{\partial^i S}{\partial t} \cong \frac{S - S^*}{\tau}. \quad (4.9)$$

Вероятность необратимого процесса тем больше, чем меньше плотность потока энтропии и время релаксации.

Придерживаясь такого подхода, В.В. Федоров предложил свою термодинамическую концепцию разрушения материалов при пластической деформации и при изнашивании.

В его работах разрушение опосредовано конкуренцией двух взаимосвязанных, но противоположных тенденций роста плотности повреждаемости I_e и снижения (высвобождения) этой энергии за счет релаксации.

Из (4.8) и (4.9)

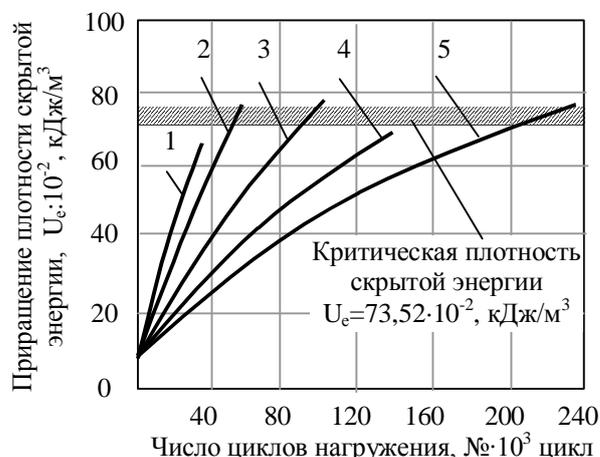
$$\omega \sim \exp \left(\frac{J_s \tau}{K} \right), \quad (4.10)$$

где J_s – диссипативный поток.

Скрытую энергию повреждаемости создают флуктуации тепловой энергии в поле механических напряжений. При достижении критической плотности скрытой энергии происходит разрушение, как это показано на рис. 4.2, в зависимости от величины действующих напряжений.

Кинетические кривые изменения плотности скрытой энергии U_e в деформируемом объеме материала (сталь 45) до момента разрушения при N циклов нагружения:

- 1) $\sigma_a = 25,3 \text{ кгс/мм}^2$, $N = 28 \cdot 10^3$ ц;
- 2) $\sigma_a = 24,8 \text{ кгс/мм}^2$, $N = 59 \cdot 10^3$ ц;
- 3) $\sigma_a = 23,9 \text{ кгс/мм}^2$, $N = 88 \cdot 10^3$ ц;
- 4) $\sigma_a = 23,1 \text{ кгс/мм}^2$, $N = 133 \cdot 10^3$ ц;
- 5) $\sigma_a = 22,5 \text{ кгс/мм}^2$, $N = 265 \cdot 10^3$ ц.



Р и с. 4.2. Характеристика разрушения по В.В. Федорову

При описании изнашивания В.В. Федоров использовал определение величины износа в виде

$$J = \frac{V}{S}, \quad (4.11)$$

где V - объем продуктов износа, а S - площадь поверхности трения.

Используя представления о запасенной энергии повреждений, В.Д. Федоров представил износ как отношение скоростей изменения основных компонентов энергии:

$$J = \frac{\dot{U}_e}{\Delta U_* - \Delta U_{Tf}} = \frac{\delta_e \omega}{\Delta U_* - \Delta U_{Tf}}; \quad (4.12)$$
$$\Delta U_* = U_* - U_0,$$

где \dot{U}_e - скорость изменения скрытой энергии в объеме материала V ; ΔU_{Tf} - изменение плотности тепловой составляющей внутренней энергии; ΔU_* - изменение плотности внутренней (скрытой) энергии; ω - удельная мощность трения; δ_e - относительная величина скрытой энергии.

В итоге обзора термодинамического подхода к интерпретации изнашивания приведем точку зрения Л.И. Бершадского, который рассматривал разрушение материала при изнашивании как переход вещества в форму с большей энтропией, т.е. в менее упорядоченное состояние. Разрушение наступает после достижения некоторой критической величины накопленной энергии (беспорядка) и негэнтропии (меры разнообразия).

Такое определение поражает точной характеристикой физического критерия износостойкости или работоспособности материала как главного объекта трибосистемы.

1.17. 4.4. Физические методы изучения состояния поверхностных слоев

В настоящей главе, касающейся изучения кинетики изнашивания, авторы используют как литературные источники, так и собственные результаты исследований, выполненных в разные годы в Самарском государственном техническом университете.

Отличительной чертой наших исследований является их комплексный характер, что выражалось в одновременном изучении группы процессов и явлений, наблюдавшихся при изнашивании образцов и деталей.

При исследованиях в трибологии используют ряд общепринятых характеристик материалов. Приведем их краткий обзор.

Твердость. Впервые эта характеристика была введена Моосом, предложившим шкалу твердости различных минералов.

В настоящее время под твердостью материала принято считать сопротивление, которое оказывает испытуемое тело при внедрении в него более твердого индентора.

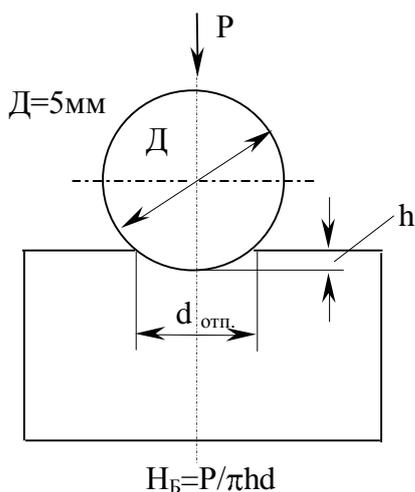
Твердость измеряют методами Бринеля (вдавливание шарика), Виккерса (вдавливание четырехгранной алмазной пирамиды с углом между гранями 136°), Роквелла (вдавливание алмазного конуса с углом при вершине 120°). Эти методы удобны в производстве и широко применяются для контроля качества деталей.

При измерении твердости на небольших участках поверхностей применяют метод измерения микротвердости при малых нагрузках на индентор от 0,02 до 0,2 кг. Микротвердость можно измерить в пределах одного зерна, на границах его карбидных включений, по косому шлифу для изучения изменений твердости по глубине от поверхности и др.

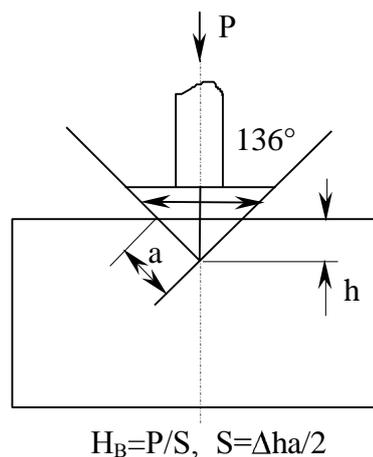
Метод микротвердости обычно применяют в исследовательских целях.

Следует отметить, что основные достоинства методов твердости и микротвердости - их простота и высокая объективность, - не компенсируют ограниченности получаемых сведений для изучения физических процессов, происходящих в материалах.

Схемы измерений твердости приведены на рис. 4.3. – 4.7.



Р и с. 4.3. Схема измерения твердости по Бринелю



Р и с. 4.4. Схема измерения твердости по Виккерсу

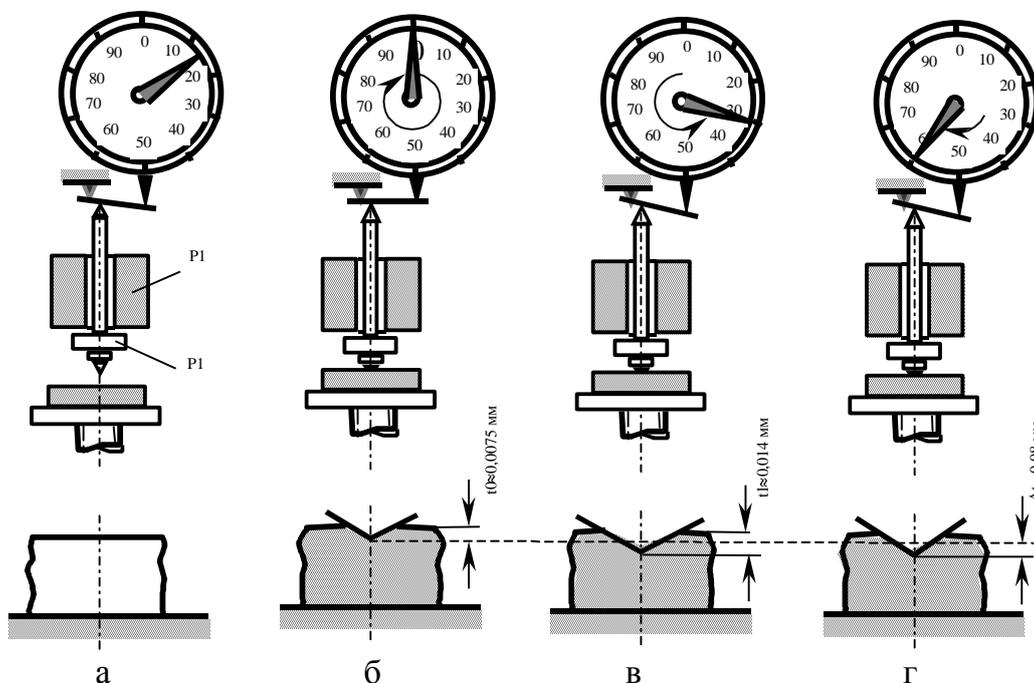
Пластичность. Как указывалось в гл. 3, для трибологии имеет важное значение характеристика пластических свойств антифрикционных материалов. Однако в отличие от твердости или модуля упругости характеристика пластичности материала является структурно-чувствительной и зависит от состояния материала, поэтому не существует характеристики пластичности материалов, которая являлась бы его константой.

Пластичность в понятиях механики деформируемого твердого тела означает необратимую деформацию материала под действием внешних сил. Обычно ее выражают через относительную деформацию сдвига под действием сдвигающего напряжения (τ_{cd}).

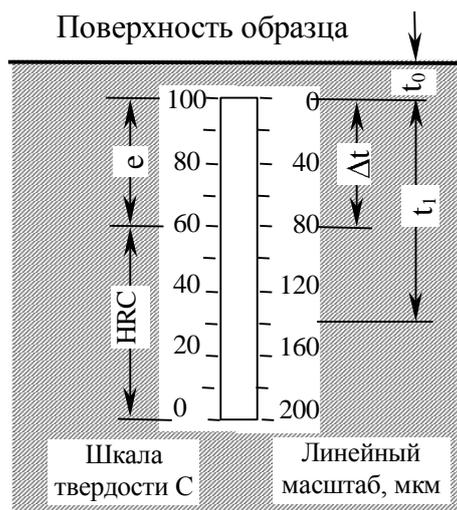
По уравнению Я.И. Френкеля

$$\tau_{cd} = \frac{a}{b} - \frac{G}{2\pi}, \quad (4.13)$$

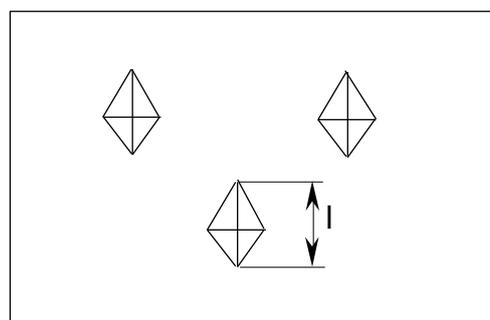
где G - модуль сдвига; a - межзатомное расстояние в направлении скольжения; b - межплоскостное расстояние.



Р и с. 4.5. Схематическое изображение измерения твердости по шкале С. Роквелла: а – перед началом измерения; б - «установка нуля», дана предварительная нагрузка; в - дана основная нагрузка; г – считывание результата по шкале индикатора, основная нагрузка снята



Р и с. 4.6. Связь между глубиной отпечатка и твердостью по шкале С.Роквелла



$$H_{\mu} = P/S$$

Р и с. 4.7. Схема измерения микротвердости по Виккерсу

В кинетическом подходе энергетической характеристикой или мерой пластичности материалов принято считать энергию активации пластической деформации (см. гл. 3).

1.18. Фрактография износа

При изучении рельефа изнашиваемых поверхностей и структурных характеристик поверхностного слоя материалов широко применяют **оптическую и электронную микроскопию**.

Оптическая микроскопия чаще всего применяется для получения картины размеров и распределения структурных составляющих материала по фотографиям полированных и слегка протравленных участков поверхностей деталей или образцов материала (шлифов).

Зная увеличение на фотографии, легко измерить размеры зерен и их составляющих. В лучших оптических микроскопах увеличение достигает 1000. Примеры оптических и электронных фотографий изношенных поверхностей приведены на рис. 4.8.

Электронные микроскопы позволяют получить гораздо большее, чем у оптических, увеличение - до 500 000 раз и больше.

На электронных микроскопах возможны съемки «на просвет», если изучается структура и состояние тонких пленок, и при отражении. В режиме отражения работают растровые электронные микроскопы (РЭМ).

Метод РЭМ широко применяют для наблюдения топографии поверхностей, например, если поверхность содержит островки пленок вторичных структур, то после оттенивания реплик под заданным углом по фотографии можно определить толщину этих пленок.

Широкий круг методов структурного анализа основан на **дифракции рентгеновских лучей**, электронов и нейтронов, которые могут быть направлены на изучаемый объект.

При **рентгеноструктурном анализе** используют лучи с длинами волн в интервале $0,05 \div 0,25$ нм, соизмеримыми с межатомными расстояниями в твердых телах и жидкостях, что позволяет им проходить сквозь непрозрачные для световых лучей объекты. Проходя сквозь твердое вещество, рентгеновские лучи испытывают дифракцию на атомах кристаллической решетки. Условие максимумов описывается формулой Вульфа-Брегга:

$$n\lambda = 2d \sin\theta, \quad (4.14)$$

где d - расстояние между соседними параллельными атомными плоскостями кристалла; θ - угол скольжения; λ - длина волны рентгеновского излучения; n - порядок максимума.

Дифракционные картины получают на рентгенограммах при фотографическом методе регистрации в камерах Дебая или на дифрактограммах с автоматической регистрацией счетчиками интенсивности рассеяния рентгеновских лучей. Дифракционная картина в целом позволяет выявить и оценить качественно и коли-

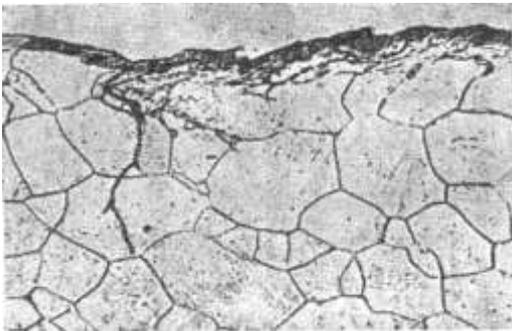
чественно изменения фазового состава материалов трущейся пары, межплоскостные расстояния в кристаллических решетках фаз, изменения параметров кристаллической решетки при диффузионном перераспределении легирующих элементов и образовании твердых растворов, изменения состояния тонкой кристаллической



а



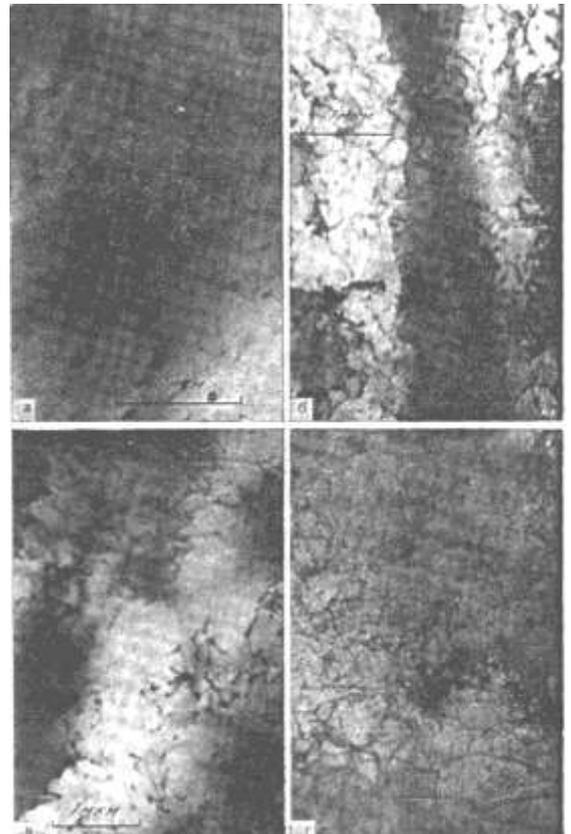
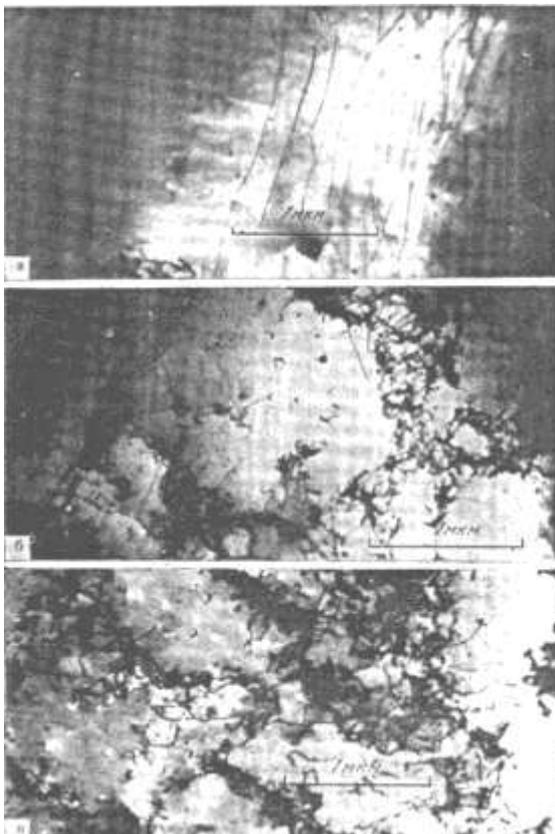
б



в



г



Р и с. 4.8. Электронные (x10000) и оптические фотографии изнашиваемых поверхностей: а – чугунная; б – стальные изношенные поверхности; в – усталостные трещины (косой срез); г – поверхность, поврежденная фреттинг-коррозией; д - развитие дислокационной структуры меди; е - развитие усталости при трении кристаллов железа структуры деформированных трением поверхностных слоев металлов, сплавов и др.

Приведем в качестве примера методику и результаты рентгеноструктурных исследований поверхностных слоев образцов титановых сплавов ВТ 9, подвергнутых деформации трением в условиях фреттинг-коррозии. Испытания проведены в лаборатории «Надежность трибосистем» НИИ проблем надежности механических систем при Самарском ГТУ применительно к условиям работы замков и бандажных полок лопаток турбокомпрессоров авиадвигателей. Состояние тонкой кристаллической структуры поверхностных слоев оценивалось методом аппроксимации по изменению физического уширения рентгеновских интерференционных линий, интегрально отражающего изменения размеров блоков мозаики (D) и микроискажений ($\Delta d/d$) кристаллической решетки металла, деформированного при фреттинг-коррозии.

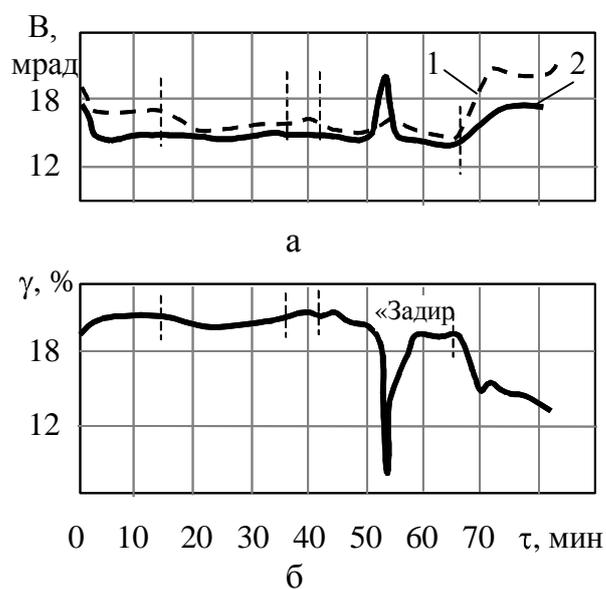
Рентгенографирование изнашиваемых поверхностей осуществлялось на дифрактометре ДРОН 2. Использовалось $K\alpha$ излучение при антикатоде из меди. Фиксировались наиболее интенсивные дифракционные максимумы 01,1 и 01,3 - α фазы сплава ВТ 9 (рис. 4.9) и 01.1, 11.2 - α фазы сплава ВТ 3-1 (см. рис. 4.9,б). Интенсивность рассеяния рентгеновских лучей регистрировалась ионизационным счетчиком и записывалась автоматически потенциометром.

Ширина интерференционной линии рабочего образца определялась по формуле

$$B^I = S/J_m, \quad (4.15)$$

где S - площадь, заключенная между дифракционной кривой и линией фона, определяемая планиметрированием; J_m - интенсивность в максимуме дифракционной кривой.

Размытие (уширение) экспериментальной интерференционной линии является следствием не только изменения размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) и микроискажений решетки, но и наложения или неполного расщепления $K_{\alpha 1}$ - $K_{\alpha 2}$ дублета, влияния геомет-



Р и с. 4.9. Кривые изменения ширины интерференционных рентгеновских линий (а) и количества γ - F_c - фазы активного слоя (б) в процессе трения стальных поверхностей:

1 - ширина рентгеновской линии (110) α - фазы; 2 - ширина линии (111) γ - фазы

рических факторов расходимости первичного пучка рентгеновских лучей, поглощения в образце, отклонений расположения и размеров диафрагм, неточности юстировки и др. Влияние геометрических факторов на ширину интерференционной линии устранялось съемкой эталона из сплава ВТ6С, отожженного в вакууме.

Истинное физическое уширение $K_{\alpha 1}$ составляющей дублета определялось графически при аппроксимации экспериментальной интерференционной линии функцией вида

$$Y = (1 + \gamma X^2)^{-2}. \quad (4.16)$$

Для оценки градиента структурных изменений по глубине деформированного слоя была применена оригинальная методика с использованием рентгеновских лучей различной проникающей способности при сохранении фиксирующей схемы съемки на дифрактометре, что позволило избежать недостатков методов исследования, требующих послойного удаления материала, нарушающего исходное состояние структуры исследуемых материалов.

По этой методике изучаемые характеристики состояния тонкой структуры находили путем последовательных съемок на каждой точке изучаемой поверхности образца при помощи 3-4-х рентгеновских трубок с разной глубиной проникающего излучения.

Эффективная глубина проникновения лучей в образец определялась из выражения

$$G_t = 1 - \exp \left[-\mu_{\lambda} t \left(\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\sin \beta} \right) \right], \quad (4.17)$$

где G_t - часть интенсивности рассеянных лучей, связанная со слоем толщиной t ; μ_{λ} - линейный коэффициент ослабления рентгеновских лучей; α и β - соответственно, углы падения и отражения лучей.

При съемке на дифрактометре $\alpha = \beta = \theta$ при $G_t = 0,75$; t - толщина слоя, рассеивающего 75 % энергии первичного пучка; глубина слоя, участвующего в образовании дифракционной картины, определялась по формуле

$$t = 1,39 \sin \theta / 3 \mu_{\lambda}. \quad (4.18)$$

Разделение вклада в уширение интерференционных линий блочности и микроискажений проводили по двум линиям, принадлежащим кристаллографическим плоскостям 01,1 и 01,3 α - T_i , по формулам:

$$4\varepsilon \sin \theta_1 = \frac{(\beta_2 \cos \theta_2 - \beta_1 \cos \theta_1)(E_2/E_1)}{[(\sin \theta_2 / \sin \theta_1) - (E_2/E_1)]}, \quad (4.19)$$

где $\varepsilon = \Delta d/d$ - микроискажения; D - размер блоков мозаики; λ - длина волны рентгеновского излучения; θ_1 и θ_2 - углы отражения первой и второй линии; β_1 и β_2 - физическое уширение первой и второй линий, E_1 и E_2 - модуль Юнга в направлении, перпендикулярном отражающей плоскости.

В нашей практике использовались рентгеновские трубки с медным, кобальтовым, железным и хромовыми антикатадами, что позволило получить информа-

цию о состоянии тонкой кристаллической структуры в слоях глубиной от 1,3 до 5 мкм.

Наименьшие значения плотности дислокаций на границах блоков мозаики определяли по формуле:

$$\rho = 3/D^2. \quad (4.20)$$

Результаты применения данной методики приведены ниже.

Метод скользящего пучка. Метод скользящего пучка рентгеновских лучей создан в Институте машиноведения РАН Л.М. Рыбаковой и Л.И. Куксеновой.

Обычно рентгеновские методики позволяют изучать слои глубиной от 10^{-6} до 10^{-4} м. Однако, как следует из формул (4.17) и (4.18), анализируемую толщину материала можно уменьшить еще в несколько раз, изменяя (уменьшая) угол первичного луча.

Для реализации метода скользящего пучка рентгеновских лучей проведена модернизация цилиндрических фотокамер РКД и РКУ, обеспечивающих съемку при весьма малых углах скольжения первичного пучка. Изменение длины волны рентгеновского излучения и угла скольжения α в совокупности позволило проанализировать слои глубиной менее 1 мкм (от 10^{-6} до 10^{-8} м). Методика скользящего пучка рентгеновских лучей была успешно применена авторами при исследовании физического механизма избирательного переноса при трении.

Отдельно отметим возможности **рентгеноспектрального микроанализа поверхностей трения**. Этот метод позволяет определять элементный состав поверхностного слоя. Сущность метода состоит в том, что пучком электронов диаметром около 0,5 мкм возбуждают атомы материала, составляющие поверхностные слои, которые начинают генерировать рентгеновское излучение.

Измеряя длину волны и интенсивность излучения, идентифицируют излучающие элементы и их концентрацию. Подобным же образом работают и **лазерные микроанализаторы**.

Одним из физических методов исследования в трибологии является **спектральный анализ**, позволяющий определять состав вещества тонких поверхностных слоев на основе изучения их спектров.

При возбуждении поверхности электрической дугой или искровыми разрядами анализируемый материал испаряется и испускает световое излучение. Оно разлагается призмой на спектральные линии, обработка которых позволяет идентифицировать их с излучающим веществом при вполне удовлетворительной воспроизводимости результатов. Применение упомянутых методов наиболее распространено при решении большинства задач трибологии.

1.19. 4.5. Применение рентгеновских методов исследования в трибологии

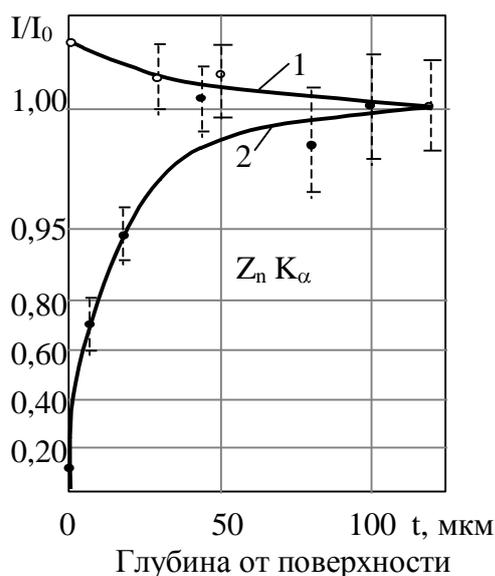
Рентгеновские методы исследования занимают ведущее место в изучении изнашивания как по своим возможностям, так и по сложившейся практике применения.

Наиболее известные результаты исследования этих процессов на поверхностях трения сплавов черных и цветных металлов были выполнены в 50-х - 70-х гг. Ю.С. Терминасовым, И.М. Любарским, Л.С. Палатником, Л.М. Рыбаковой, Л.И. Куксеновой, В.П. Алехиным и другими учеными. Наибольшее внимание в рентгеновских исследованиях вначале занимала диффузия и ее роль в развитии повреждаемости и разрушения поверхностей как фундаментальный процесс, определяющий кинетику и механизмы превращений в материале трущихся пар, отличающихся элементарным составом, различным уровнем растворимости компонентов и структурным состоянием.

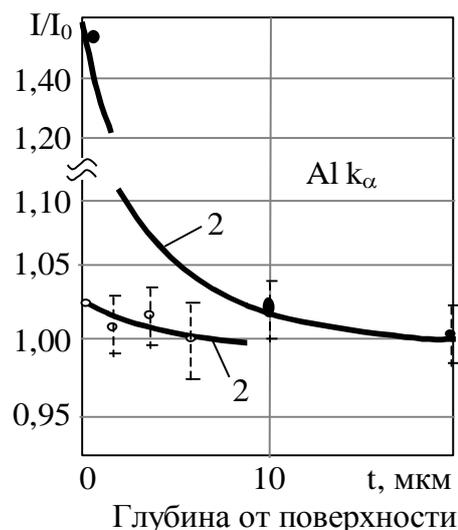
Приведем типичную картину перестройки структуры материала при схватываниях, установленную И.М. Любарским. На рис. 4.9. показано, что в момент схватывания и задира наблюдается резкое изменение ширины интерференционных линий α и γ фазы и соответственно количества аустенита.

Как видно на диаграмме, в слое толщиной 3-4 мкм материал почти полностью аустенизируется до 80-90 % γ фазы, но при дальнейших испытаниях возрастает количество α фазы, что характерно для поведения пластичных материалов и их $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ превращений.

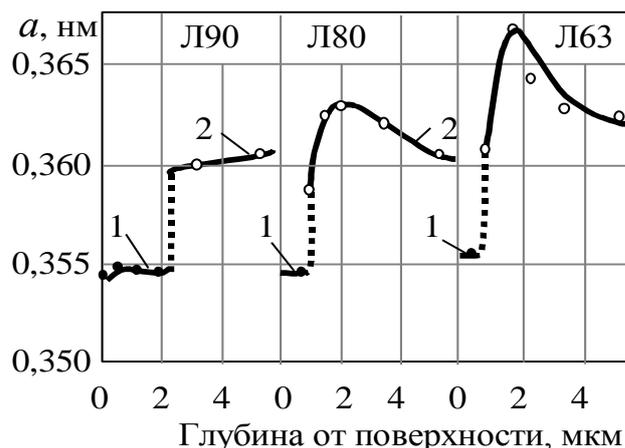
Из работ К. Накоямо (рис. 4.10) приведем полученный с помощью рентгеновского микроанализа результат изменений в поверхностном слое концентрации твердых растворов меди с Zn, Al, Ni и Ge при шлифовании и отжиге: кривая 1 - после шлифования, 2 - после отжига. Как видно, перестройка состояния при трении является кардинальной.



а



б



Р и с. 4.11. Кривые изменения периода α кристаллической решетки по глубине зоны деформации при трении латуней Л90, Л80 и Л63 с разным содержанием цинка в исходном состоянии: 1 - пленка меди; 2 - основной металл

Р и с. 4.10. Результаты рентгеновского микроанализа элементарного состава при обработке поверхностей шлифованием по данным К.Накаямо.

Изменение интенсивности отражений $Z_n K_\alpha$ (а) и $Al K_\alpha$ (б) в поверхностных слоях медных сплавов (изменение концентраций легирующих элементов): 1 - после шлифования; 2 - после отжига (J – интенсивность интерференционной линии испытываемого; J_0 – отожженного образца)

Л.М. Рыбаковой и Л.И. Куксеновой установлены интенсивные диффузионные процессы как на этапе приработки, так и в процессе установившегося изнашивания.

Так, например, при трении латуней в среде глицерина количество цинка на поверхности (от 10 до 37% на разных марках в исходном состоянии) уменьшается вплоть до полного ухода, и на их месте образуется пленка меди толщиной 1-2 мкм, (рис. 4.11).

Этот результат иллюстрирует механизм эффекта избирательного переноса меди.

Обратная ситуация наблюдается при трении алюминиевой бронзы в смазке ЦИАТИМ-201. Здесь пленка меди не возникает. Зачастую рентгеновские методики используются для оценки характера изнашивания. Рассмотрим ряд примеров применения этого подхода, реализованных в Самарском техническом университете при поддержке и консультациях одного из основоположников отечественной рентгенографии в физическом металловедении профессора, д-ра техн. наук Терминасова Ю.С.

4.5.1. Пример исследования изнашивания шарниров шасси самолетов

Первоначально для общей оценки ситуации здесь были собраны статистические данные о состоянии шарниров шасси, поступающих на ремонтные предприятия и авиационно-технические базы гг. Самары, Минска, Ростова-на-Дону, С.Петербурга, Киева и Риги, а также в аэропортах Пулково и Борисполь.

Общая статистика износа приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1.

Данные видов и характера разрушения трущихся поверхностей

Объект износа	Фреттинг-коррозия	Усталость	Износ	Коррозия
Передняя стойка	15 %	21,2 %	50,16 %	13,04 %
Главная стойка	31,25 %	27,26 %	23,4 %	18,19 %

Характерным являлся износ в парах: втулка из бронзы БрАЖН10-4-4, ось из стали 12ХНЗА с покрытием твердым хромом. Смазка - ЦИАТИМ-203. Оказалось, что в этих парах износ имеет абразивный характер, а абразивная среда формируется при накоплении продуктов износа и внешних загрязнений в пластичной смазке. За период между техническим обслуживанием количество твердых частиц в смазке достигло 15 % от общего объема смазки. Дисперсность частиц бронзы, глины и кремния составляла 0,1...30,0 мкм. Элементный состав, полученный рентгеновским анализом, приведен в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Состав продуктов износа

Вульф - Бреговский угол	Вещество	Количество в объеме
4.5...5,1	Глины + Al ₂ O ₃	} > 80%
16,9	Кварц пылевидный	< 10%
27,1	БрАЖН10-4-4	
28,15	Cu	<
28,7	Fe	

Примечание. Идентификацию линии окиси алюминия проводили при использовании хромового антикатада ($\lambda\alpha = 2,29 \text{ \AA}$) по эталону при обработке интерференционных кривых. Масштаб по оси абсцисс составлял $1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ рад}$. Угол $\theta \approx 55^\circ$, $\text{Sec} = 1,75$. Площади планометрирования S_3 и $S_{\text{обр}}$ составляли 225 и 240 мм², полуширина 7 и 12 мм, полуширина пика физического уширения, соответственно, 12 и 10^{-3} рад . В итоге оценки средние размеры кристаллов высокодисперсной фазы составили величину, рассчитываемую по формуле

$$L = \frac{0,94\lambda}{\beta_{0,5} \cdot \cos V} R \approx 4 \cdot 10^{-7} \text{ м} .$$

Подготовка к анализу состояла в том, что пластичную смазку извлекали из зазора (например, в шлицшарнире содержится около 12 граммов смазки), отмывали нерастворимые частицы бензином «калоша», собирали твердые частицы на бумажном фильтре и создавали из них таблетку, которую помещали на предметный столик рентгеновского дифрактометра. Особенности методики даны в примечании к табл. 4.2.

Тщательный анализ твердых частиц показал, что часть из них является материалом современных абразивных инструментов, которые шаржируются в поверхность при обработке (шлифовании), а затем отделяются и попадают в смазку.

4.5.2. Пример исследования изнашивания чугунных поверхностей

Рентгеновское исследование в этой работе входило в комплекс, целью которого было изучение изнашивания чугунных пар трения скольжения и качения из серого литейного чугуна, а также отливок, легированных марганцем и ферросиликохромом, HB = 180...320, при моделировании условий трения в условиях вибрации.

Комплекс предусматривал испытания на износ плоских и кольцевых образцов с шабреными и шлифованными поверхностями и различные исследования состояния материала поверхностей трения через заданные интервалы времени работы.

Все исследуемые характеристики состояния в выбранном масштабе наносились на графики для анализа изменений в функции времени.

Перечень изучавшихся параметров включал следующие процедуры:

измерение величины износа;

измерение высотных характеристик шероховатости (R_a , R_z);

измерение микротвердости H_{μ} при навеске 0,2 кг;

измерение контактной жесткости;

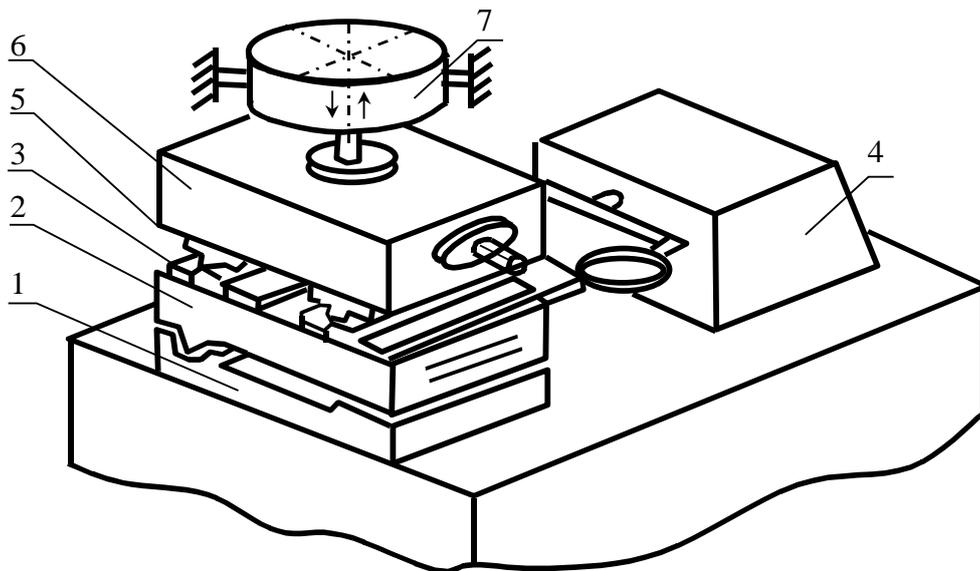
измерение характеристики рассеяния стыком упругой энергии (логарифмического декремента колебаний);

изучение состояния рельефа методом электронного фотографирования (растровый и сканирующий микроскопы $\times 10000$);

изучение структурного состояния по рентгеновским дифрактограммам.

Испытания на износ проводились при возвратно-поступательном и однонаправленном трении. Диапазон контактного давления $0,1 \div 1$ МПа. На статическую часть накладывали динамическую составляющую нагрузки при частоте 200 Гц. Её величина достигала ~ 20 % от статической. Величину износа определяли по уменьшению глубины лунок-свидетелей.

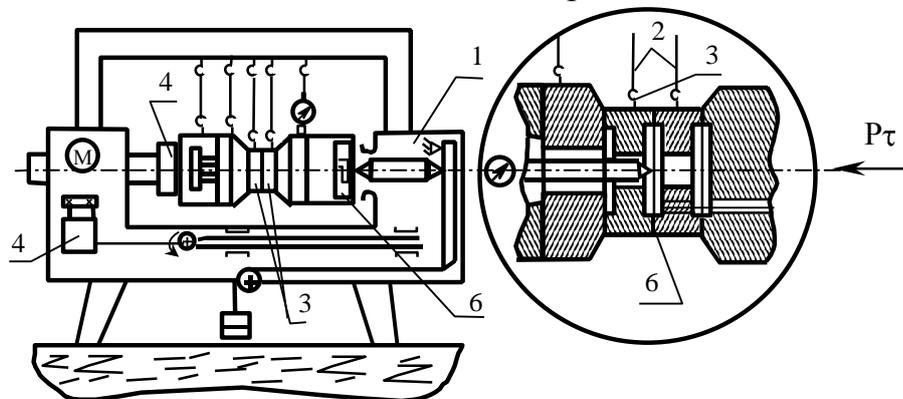
Вид установки приведен на рис. 4.12.



Р и с. 4.12. Схема установки для испытаний на износ с наложенной вибрацией
 1 – станина; 2 - подвижная каретка; 3 – образцы; 4 – гидропривод; 5 - верхняя планка образцов; 6 - нагрузочная плита; 7 - электродинамический вибратор

Шероховатость определяли на профилографе - профилометре модели-201 з-да «Колибр», микротвердость - на микротвердомере ПМТ-3.

Контактная жесткость, н/м, $k = P/\Delta$, где P - нагрузка, Δ - сближение измерялось при нагружении испытываемой пары на специальной установке (рис. 4.13.). Образцы 3 подвешены на станине 1 и соприкасаются стыком 6. Нагруже-



Р и с. 4.13. Схема установки для исследования контактной жесткости при изнашивании контактирующих поверхностей

ние производится кулачковым механизмом 4, контактное сближение измеряется индикатором часового типа.

Логарифмический декремент колебаний $\delta = \ln A_n / A_{n+1}$, где A_n и A_{n+1} - соседние амплитуды затухающих колебаний изучали при импульсном возбуждении нормальных колебаний в паре трения.

Изучение состояния тонкой кристаллической структуры поверхностных слоев проводилось на дифрактометрах УРС-50ИМ с использованием железного

антикатода, при котором потенциометр ЭПП-09-03 записывал интерференционные линии $(110)\alpha$, $(220)\alpha$, $(111)\gamma$ и $(311)\gamma$. Изменение ширины этих линий позволяло определять микроискажения кристаллической структуры, изменения размеров кристаллических блоков и плотность дислокаций. Прибор настраивался так, что самописец вычерчивал на ленте линии интенсивности рентгеновских лучей в зависимости от угла, под которым они отражались от образца и падали на счетчик квантов. Эталонные образцы получали путем длительного отжига.

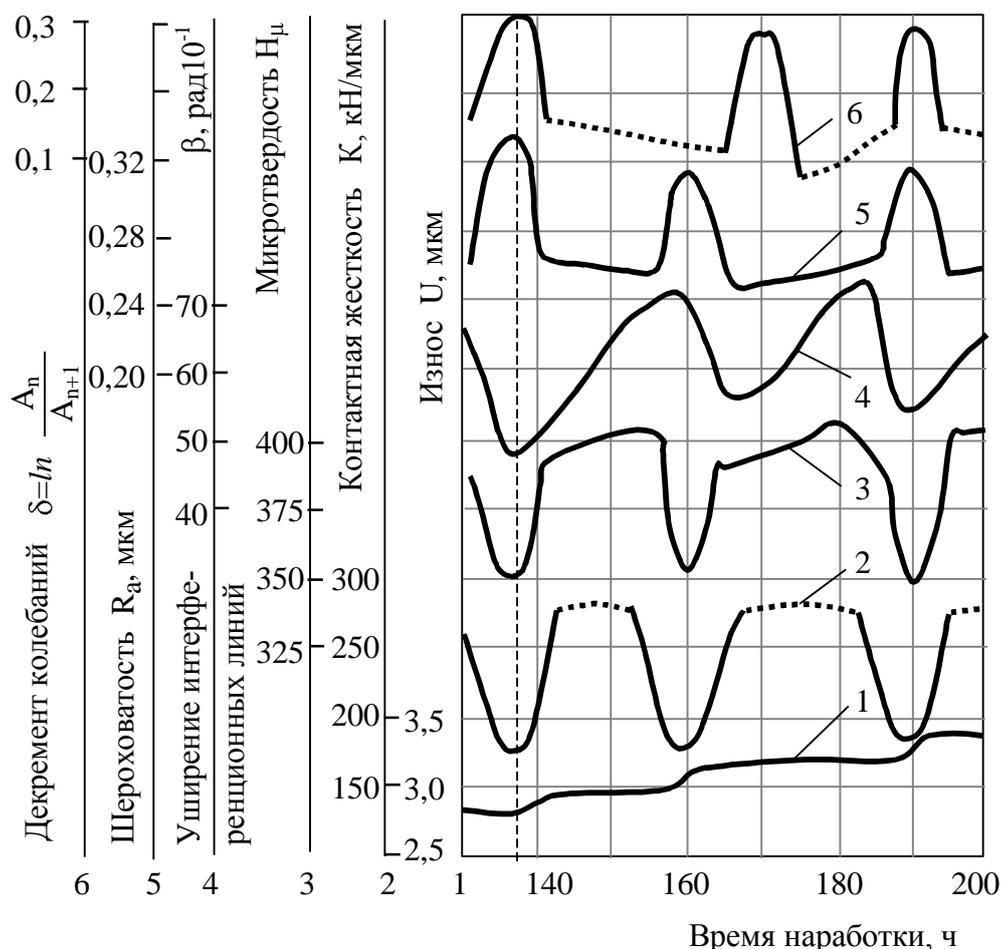
Порядок рентгенографирования был следующим. Сначала снимали рентгенограмму с эталонов, затем несколько раз с поверхностей изношенных образцов с периодичностью 1-2 часа испытаний.

Наиболее существенный вывод из этого исследования заключался в том, что контролируемые параметры состояния материала периодически изменялись во времени. При этом скорости изменений при постоянном режиме испытания и приработке оказались различными. Общие итоги этого исследования приведены на рис. 4.14.

Важнейший вывод, полученный из данного исследования, состоял в том, что материал поверхностного слоя в процессе трения на возвышенностях поверхностей интенсивно «запасал» повреждения, нарастала плотность дислокаций, изменялась блочность мозаики, а соответственно и уровень микроискажений.

При достижении критической плотности повреждаемости (уширение рентгеновских линий - порядка $70 \text{ рад} \times 10^{-4}$) начинается разрушение слоя толщиной 1-3 мкм, его отделение и унос продуктов износа.

Уровень характеристик состояния материала при этом падает до исходного значения, а затем цикл начинается сначала.



Р и с. 4.14. Результаты комплексного исследования изнашивания и трансформации контактных характеристик плоских пар СЧ 21-40:

1 - износ; 2 - контактная жесткость; 3 - микротвердость; 4 - уширение интерференционных линий; 5 - шероховатость; 6 - демпфирующая способность пары

Исследование однозначно показало, что основным механизмом разрушения поверхностей являлось накопление повреждаемости. Цикличность изнашивания была использована для моделирования изнашивания, что будет рассмотрено ниже.

Полученные результаты совпали с данными, ранее полученными Ю.С. Терминасовым, В.В. Шевеля, Е.А. Марченко и, возможно, другими исследователями. Обобщение, приведенное здесь, было сделано впервые в 1978 г. в журнале «Металловедение и термическая обработка» № 6.

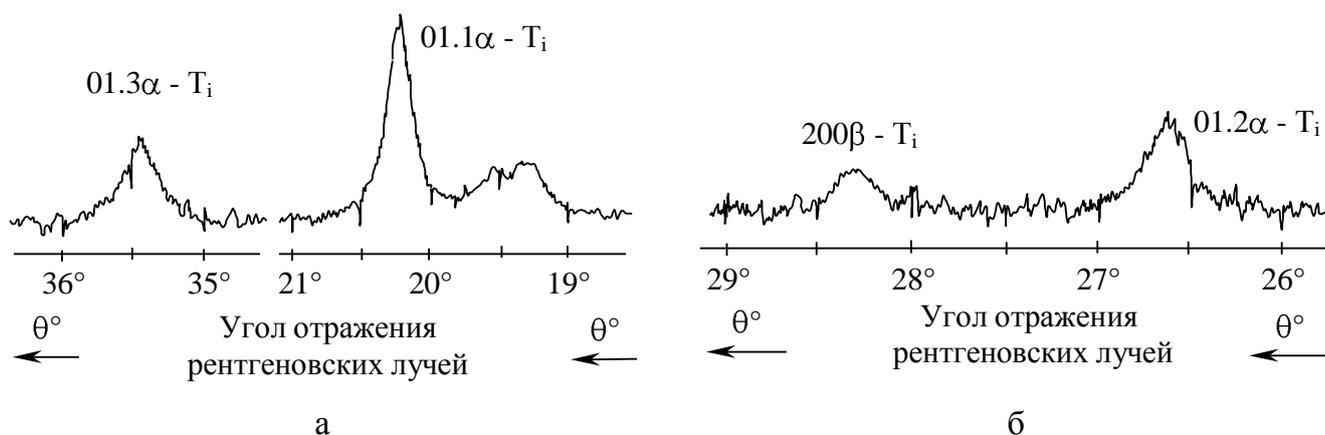
Более детально закономерности изнашивания были выявлены при изучении фреттинг-коррозии на титановых сплавах А.Г. Ковшовым.

4.5.3. Пример комплексного исследования изнашивания при фреттинг-коррозии титановых сплавов

В процессе комплексного экспериментального исследования механизма фреттинг-коррозии титановых сплавов, выполненного А.Г. Ковшовым так же, как в

вышеприведенном случае, наряду с физическим уширением рентгеновских интерференционных линий, изменениями фазового состава и дефектов структуры, регистрировали износ, коэффициент трения, микротвердость и шероховатость поверхностей, относительную опорную длину профиля, контактную жесткость и демпфирующую способность пары.

Съемки при различной глубине проникающего излучения, фазовый анализ поверхностных слоев, подвергнутых наработке в режиме фреттинг-коррозии, проводили по методике М.И. Ермаковой путем сравнения интегральных интенсивностей рентгеновских интерференционных линий 01,2 L и 200 - фаз титанового сплава ВТ9 с углами отражения на $C_{\text{и}} K_L$ - излучении $26^{0}37/30$ » и $28^{0}18/48$ » (рис. 4.15).



Р и с. 4.15. Рентгеновские дифракционные максимумы титанового сплава ВТ9

Содержание β - фазы определяли по формуле

$$V_{\beta} = 100 / (1 - 2/33 I_{(01.2\alpha)} / I_{(200\beta)}), \quad (4.21)$$

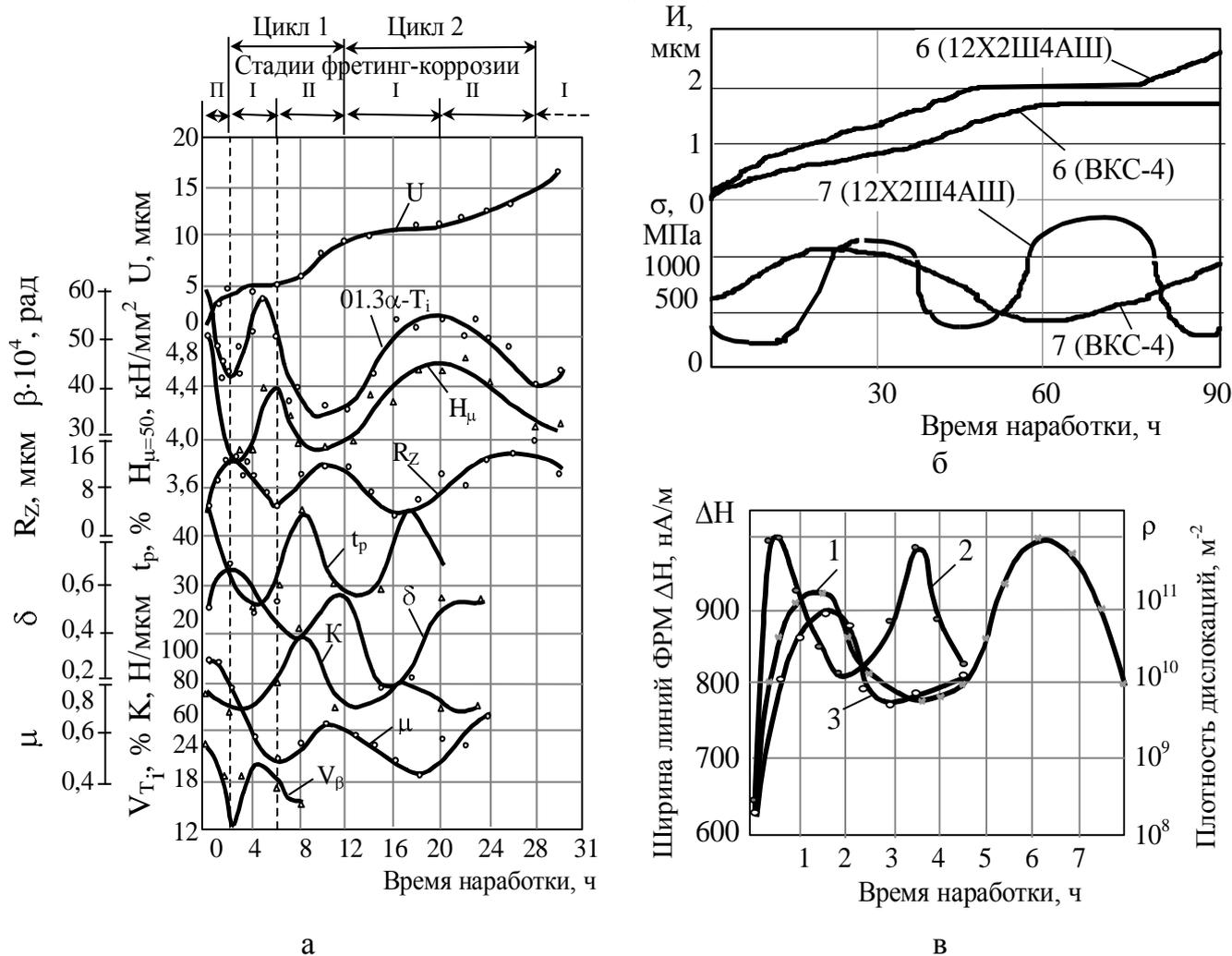
где $I_{(01.2\alpha)}$ и $I_{(200\beta)}$ - интегральные интенсивности рентгеновских линий 01,2 L- β_{Ti} и 200 - T_i .

Результаты исследования кинетики изменений состояния материала по глубине от свободной поверхности приведены на рис. 4.16, а параметры, определяющие глубину проникновения лучей в тело образца, приведены в табл. 4.3. На рис. 4.16,б изображены циклы износа и остаточных напряжений; на рис 4.16,в - плотность дислокаций при изнашивании никелевого сплава.

На рис. 4.16,в - ΔH изменение ширины линии ферромагнитного резонанса и плотности дислокаций ρ на поверхность детали из никелевого сплава 1 и 3 при нагрузке 84 кПа, 2-168 кПа по данным В.Г.Пинчука (Минский ГУ).

Иллюстрация кардинальных изменений состояния материала по глубине поверхностного слоя при фреттинг-коррозии сплава ВТ9, микроискажений, величины блоков мозаики и общей плотности дислокаций приведены на рис. 4.17, а параметры, определяющие глубину проникновения лучей в тело образца, в табл. 4.3.

Комментируя рис. 4.18, еще раз обратим внимание читателя на тот факт, что циклы разрушения (их длительность и амплитуда) являются наиболее объективной и достаточно полной кинетической характеристикой накопления повреждае-



Р и с. 4.16. Кинетические характеристики изменения состояния материала на трущихся поверхностях.

На рис. 4.16, а – при фреттинге титанового сплава

U – износ; $01.3\alpha - T_i$ – ширина интерференционной линии $\alpha - T_i$; H_μ – микротвердость; R_z – высота шероховатостей; t_p – относительная опорная длина профиля; δ – логарифмический декремент колебаний; K – контактная жесткость; μ – коэффициент трения; V_β – содержание β - фазы титана

мости и разрушения локализованного на выступах неровностей микрообъема материала.

Общность механизма цикличности также иллюстрируют рис. 4.15 и 4.17. Пик накопления повреждаемости здесь соответствует максимальной интенсивности повреждений – причины фазовых переходов.

Наиболее динамичную картину изменения состояния материала разрушаемого трением, дают зависимости, приведенные на рис. 4.17, где для каждого времени испытания образцов (10, 14, 20 и 26 ч) меняли глубину проникновения рентгенов-

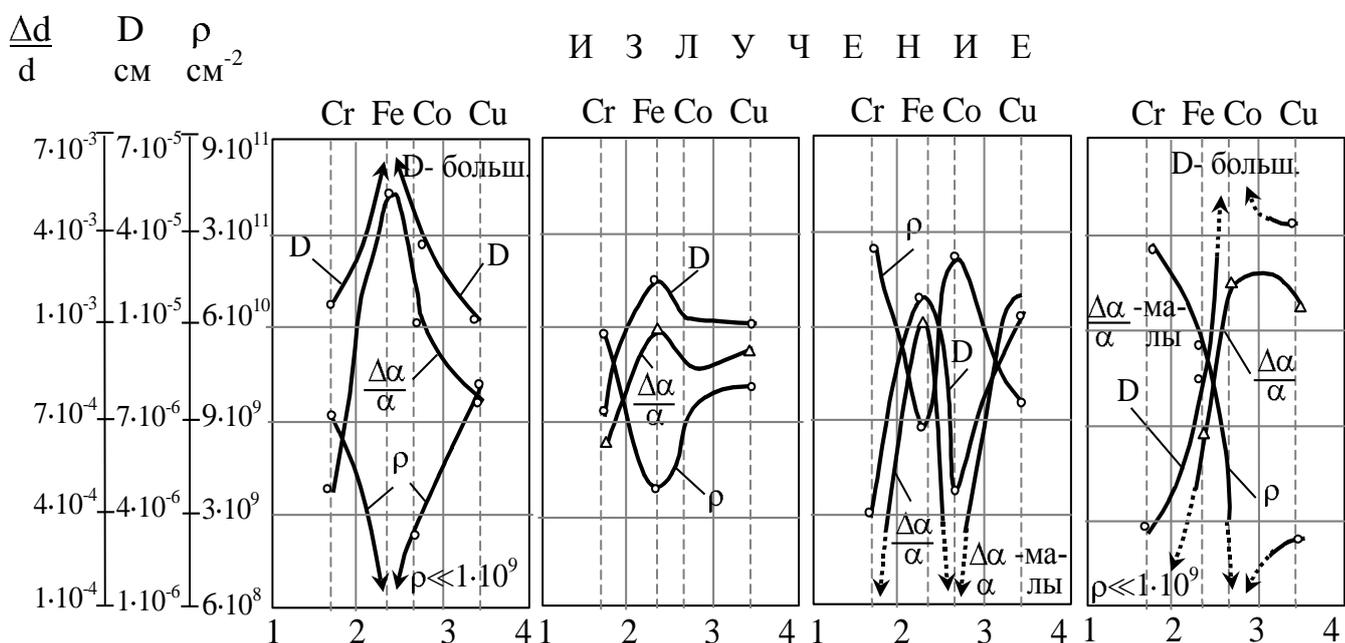
ского излучения и тем самым выявляли отличие характеристик исследуемого слоя по глубине от свободной поверхности.

Как видно из этого рисунка, для каждого времени наработки имеет место существенное различие абсолютных значений характеристик, но их экстремум все-

Таблица 4.3.

Параметры, определяющие глубину проникновения рентгеновских лучей в образец

Материал антикатада	Длина волны $\lambda_{K\alpha}$, А	Плотность материала ρ , г/см ³	Массовый коэффициент ослабления $\mu_{л}/\rho$, см ² г ⁻¹	Линейный коэффициент ослабления $\mu_{л}$, см ⁻¹	Индексы интерференции h k l	Углы отражения лучей $\theta_1^\circ; \theta_2^\circ$	$\sin \theta$	Глубина проникновения лучей в образец $x^* = 1,39 \sin \theta$, см $2\mu_{л}$
Cr	2,291	4,54	603	2740	01.1	30 48	0,512	0,00013
					01.3	59 36	0,8625	0,000219
Fe	1,937	4,54	377	1711	01.1	25 33	0,4316	0,000175
					01.3	46 49	0,7294	0,000296
Co	1,79	4,54	304	1380	01.1	23 29	0,3984	0,0002
					01.3	42 11	0,6715	0,000338
Cu	1,542	4,54	204	926	01.1	20 04	0,3432	0,000258
					01.3	35 20	0,5784	0,00043

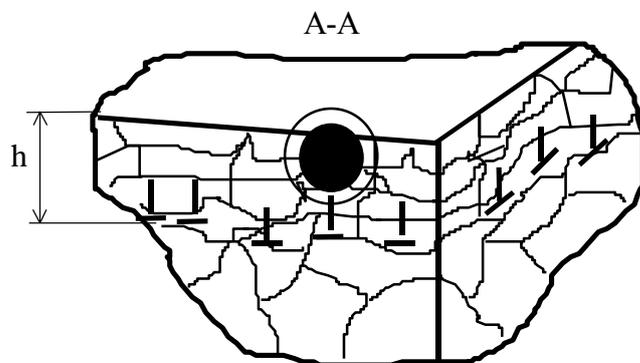
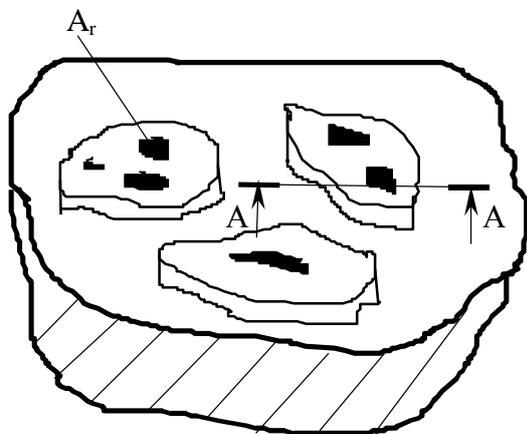


Р и с. 4.17. Изменение состояния поверхностей после 10, 14, 20 и 26 часов испытаний в режиме фреттинга:

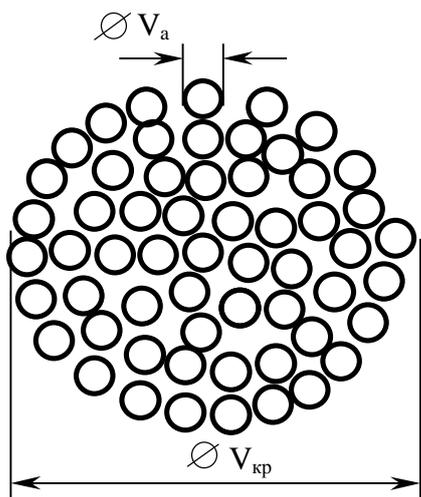
$\Delta d/d$ - величина микроискажений; D – величина блоков мозаики; ρ - плотность дислокаций

где расположен на глубине 2 – 3 мкм, являющейся характерной границей между деградирующим и нижележащим слоями материала.

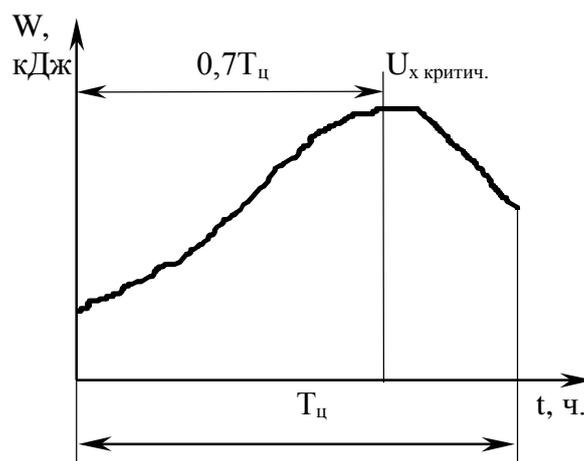
Как видно, вся совокупность примененных средств и методик позволила подтвердить фундаментальное явление: во всем исследованном диапазоне механических и термических воздействий на материал контактирующих пар при трении все кинетические кривые износа имеют ступенчатый характер, отражающий факт изменения состояния материала на поверхности.



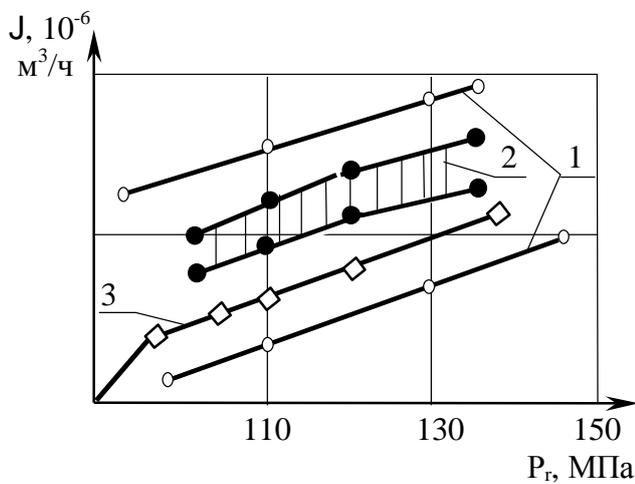
а



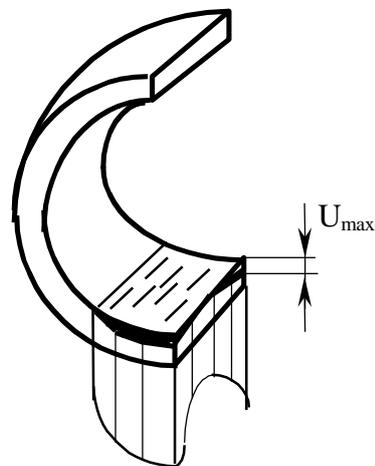
б



в



г



д

Р и с. 4.18. Изменения параметров поверхностного слоя:

- а – образование активируемого микрообъема; б – частица износа;
в – накопление энергии повреждений в процессе трения; г – скорость изнашивания
(1 – в эксплуатации; 2 – при стендовых испытаниях; 3 – расчетные данные;
д – поле действующих нагрузок и изнашивание)

Как и в других исследованиях подобного типа, единственное объяснение периодических изменений характеристик состояния материала при изнашивании можно было получить только из анализа кинетики накопления повреждаемости: каждый участок изнашиваемой поверхности под воздействием трения проходит классический цикл «упрочнение-разупрочнение-разрушение». При этом начало каждого цикла (первая стадия) расположено после завершения группового отделения диспергированных поверхностных структур. Под воздействием трения на этих участках начинается фаза интенсивной пластической деформации, ведущей к упрочнению поверхностного слоя, что подтверждается уширением рентгеновской линии $01.3 \alpha-T_i$ (см. рис. 4.18), увеличением микротвердости H_M , снижением высоты микронеровностей R_z , коэффициента трения f и увеличением относительной площади касания A_z , уменьшением демпфирования σ и повышением контактной жесткости K . В это же время в связи с ростом теплонапряженности поверхностей происходят фазовые $\alpha \Leftrightarrow \beta$ переходы. Упрочнение обуславливает минимальный износ I на этой стадии и активное накопление дефектов структуры по глубине.

Плотность дислокаций к концу стадии возрастает, распространяясь волной в глубь металла, что облегчает условия для интенсивного окисления металлических поверхностей, диффузии кислорода и других активных компонентов среды по дефектам структуры, их растворения и образования твердых растворов в $\alpha-T_i$.

Вторая стадия изнашивания характеризуется интенсивным разрушением поверхностей. К началу второй стадии плотность дислокаций в поверхностном слое достигает пределов насыщения $\rho \dots 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Поверхностные структуры разрыхляются (величина блоков мозаики и микроискажения минимальны). В этот период материал, поверхностного слоя теряет устойчивость и разрушается, обнажая нижележащие, менее упрочненные слои. Все вместе взятое приводит к появлению «ступеней» износа (см. рис. 4.16), границы которых совпадают с началом снижения ширины рентгеновских линий, микротвердости, контактной жесткости, увеличением шероховатости, коэффициента трения и демпфирования.

Приведенный анализ кинетических характеристик состояния материалов поверхностных слоев позволил заключить, что развитие фреттинг-коррозии титановых сплавов так же, как и другие виды изнашивания, управляется усталостным механизмом разрушения материалов.

Объем книги не позволяет более детально представить огромный материал, накопленный в трибологии в области изучения изнашивания. В 1997 г. на международном конгрессе по трибологии в Лондоне были подведены итоги 60 лет работы международной ассоциации трибологов, основанной в Кембридже в 1937 г. Одним из таких итогов можно считать признание кинетического подхода и его важной роли в изучении закономерностей изнашивания, которые будут обобщены ниже.

1.20. 4.6. Общие сведения о проблеме моделирования изнашивания

В литературе, посвященной разработке моделей изнашивания материалов, особое внимание уделяется двум этапам: разработке физической модели и ее расчетной аналогии. На первом этапе выбираются исходные положения, концепция или теория, объясняющая физические аспекты процесса изнашивания, на втором - устанавливаются расчетные зависимости скорости (интенсивности) изнашивания от различных факторов. На протяжении развития трибологии было предложено множество подходов к анализу явления разрушения материала поверхностного слоя при трении. Самыми большими вехами в этом направлении, составившими классику современной трибологии, можно считать труды отечественных ученых М.М.Хрущева, В.Д.Кузнецова, И.В.Крагельского, Н.Б.Демкина, Ф.Р.Геккера, М.Н.Добычина, Г.М.Харача, А.К.Зайцева и др., а также зарубежных ученых Ф.П.Боудена, Д.Тейбора, Д.Арчарда, Т.Ф.Куинна, Польцера, и др.

В последние десятилетия наиболее интенсивно развивались представления о физико-химическом взаимодействии поверхностей твердых тел, появлялись новые расчетные модели, которые часто представляли собой вариации классических выражений. Основной прогресс при изучении изнашивания во многом можно связать с появлением новых технических средств, которые позволили использовать для анализа разрушения трудоемкие математические методы. В качестве примера можно привести использование программного пакета ANSYS 5.1. или ABAQUS для выполнения расчетов изнашивания соответственно методами конечных и граничных элементов.

Существующие расчетные модели изнашивания можно условно разделить на четыре типа: эмпирические, полуэмпирические, энергетические и кинетические.

Эмпирические модели представляют собой математическую аппроксимацию экспериментальных результатов. В них механические характеристики связываются с характеристиками процесса изнашивания (износостойкостью, скоростью изнашивания) через безразмерные эмпирические коэффициенты, не имеющие четкого физического смысла. Наиболее распространены аппроксимации в виде линейных, степенных или экспоненциальных функций.

Полуэмпирические модели включают параметры, для каждого из которых установлена связь с физико-механическими свойствами материалов, характеристиками процессов и т.д. Экспериментальная оценка этих параметров позволяет производить анализ реальных физических явлений. Расчетные зависимости в полуэмпирических моделях строятся из физических соображений с учетом размерностей параметров.

Энергетические модели появились на основе термодинамического анализа процесса изнашивания. Параметрами энергетических моделей являются основные термодинамические характеристики материала поверхностного слоя: энергия, энтропия, температура и т.д. Расчетные зависимости этого типа содержат в своей основе уравнения баланса энергии (энтропии).

Кинетические модели изнашивания построены на базе термофлуктуационной концепции прочности твердых тел. Характерной особенностью этих моделей является использование подхода Больцмана для связи скорости изнашивания с

внешними факторами и описанием свойств материала через его активационные характеристики: энергию активации и структурно-чувствительный коэффициент.

Вместе с тем, несмотря на успехи, достигнутые современной трибологией, проблему моделирования изнашивания нельзя считать завершенной. Известно множество феноменов, сопровождающих этот процесс, которые пока невозможно уложить в рамки какой-либо одной из предложенных теорий. К ним можно отнести термоактивируемое накопление повреждений, прирабатывание поверхностей при трении, цикличность изнашивания, кинетические фазовые переходы структур, физико-химическую и структурную модификации материала поверхностного слоя и т.д. Сложность описания этих эффектов усугублена спецификой модифицированного поверхностного слоя, которая требует одновременно рассматривать его как поверхность раздела фаз (мембрану), где интенсивно протекают сорбционные процессы, объемнодеформируемое твердое тело, термодинамическую и функциональную системы, т.е. как объект изучения различными дисциплинами. При этом для каждого эффекта существует свой оптимальный аспект изучения. Так, при описании процесса накопления повреждений в материале поверхностного слоя целесообразно переходить на микроуровень, где можно рассматривать конкретные виды дефектов кристаллической решетки металлов и их свойства. Для оценки термодинамических характеристик следует, напротив, проводить исследования в рамках структурно-феноменологического подхода, позволяющего абстрагироваться от отдельных микроскопических особенностей, вклад которых в общее макроскопическое состояние трудно поддается контролю и поэтому полагается заранее неизвестным. Отсюда становится ясным, что адекватную картину процесса изнашивания можно построить только на стыке нескольких наук, в свете которых одно явление может приобрести множество дополняющих друг друга аспектов.

4.6.2. Феноменологический подход

Первые попытки исследования изнашивания были связаны с установлением зависимостей скорости изнашивания от общеизвестных механических характеристик: твердости, временного сопротивления разрыву, предела усталости, модуля нормальной упругости и т.д. Наиболее удачно феноменологический подход развивался при моделировании абразивного изнашивания. Как уже отмечалось, абразивное разрушение является наиболее опасным видом износа. Абразивный износ быстро выводит из строя рабочие органы горного, землеройного, строительного, сельскохозяйственного оборудования и ходовые части машин. Износ происходит в основном в режиме микрорезания. Абразивные частицы обладают разными размерами, структурой, прочностью и твердостью. Контактное взаимодействие имеет нестационарный характер.

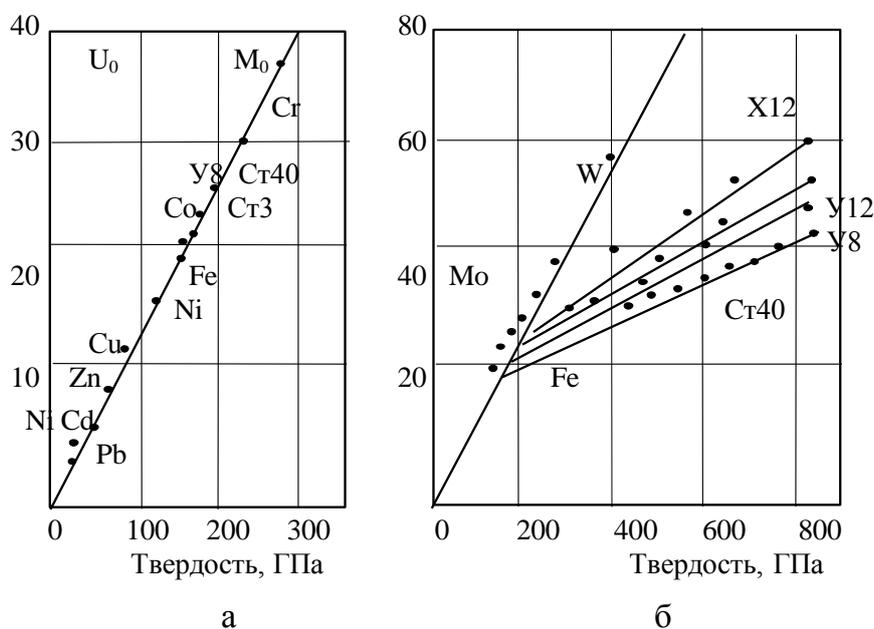
По характеру силового взаимодействия и кинематике различают скольжение детали по монолитному абразиву, свободному абразиву в насыпном состоянии, соударение с монолитным или свободным абразивом, гидро- и газоабразивное изнашивание и различные взаимодействия контактирующих тел с попавшими в

контакт частицами. Сложность и нестационарность процесса, его случайный характер не позволяют пока создать общую теорию абразивного изнашивания. Однако в целях решения практических задач накоплен большой экспериментальный материал по влиянию различных факторов на износостойкость.

Наиболее значимые результаты исследования абразивного изнашивания получены М.М. Хрущевым при испытаниях материалов скользящих по коррундовому полотну. Исследования показали, что при истирании чистых металлов в отожженном состоянии (см. рис. 4.18,а) при скольжении по свободному абразиву наиболее вероятен многоциклового износ, а относительная износостойкость пропорциональна твердости. Для термообработанных сталей связь имеет линейный характер (рис. 4.19,б):

$$U_o = U_{oc} + K (HB - HB_{oc}) . \quad (4.22)$$

Здесь U_{oc} – относительная износостойкость в отожженном состоянии; K - коэффициент; HB_{oc} - твердость в отожженном состоянии.



Р и с. 4.19. Зависимость относительной износостойкости от твердости

Износостойкость зависит от соотношения твердостей материала и абразива: $K_T = H_M/H_A$. Если $K_T < 0,7$, то происходит разрушение при однократном проходе (микрорезание). Если $K_T > 0,7$, процесс переходит в многоциклового. Твердость разных материалов по шкале Мооса показана на рис. 4.20. Шкала построена из следующих соображений: твердость мягкого минерала талька - принята за единицу, а твердость алмаза приравнена к 10 баллам. Прочность абразивных частиц растет с уменьшением размеров. Чем меньше размер, тем меньше дефектов, тем ниже вероятность разрушения. Чем жестче закреплена частица, тем выше вероятность малоциклового износа.

Привлекательность механического подхода для описания процесса разрушения при трении связана с достаточной простотой получения этих характеристик и, в некоторых случаях, возможностью описания износостойкости ϵ при помощи не-

сложных эмпирических зависимостей вида $U = f(M)$, где M - механическая характеристика.

Эмпирические модели разрабатывали М.М.Хрущев и М.А.Бабичев, В.Тонн, К.Д.Стрэнг, Д.Т.Барвелл и др. Они являются самыми ранними представителями расчетных моделей, в большинстве случаев предназначенных для оценки абразивного изнашивания деталей.

Однако формулы такого типа оказались непригодными для оценки износостойкости механически наклепанных металлов и сталей. Это объяснялось тем, что в процессе самого изнашивания перед разрушением материала наблюдается более высокий наклеп.

При изучении изнашивания металлов, сплавов и минералов о жестко закрепленное абразивное зерно В.Н. Кашеевым, В. Тонном и др. для большого числа испытанных материалов установлена нелинейная зависимость величины износа от модуля упругости E :

$$U = 0,49 \cdot 10^{-4} \cdot E^{1,3}. \quad (4.23)$$

Однако дальнейшее изучение этой зависимости показало, что авторами в опытах не было обеспечено постоянство влияния всех факторов на изнашивание материала. В ходе испытаний у них менялось соотношение значений твердости и абразива и материала.

Тем не менее, исследование соотношения твердости абразива и изнашиваемого материала позволило представить их функциональную связь отношением

$$U = \varphi \cdot \left(\frac{H_a}{H_\mu} \right), \quad (4.24)$$

где φ - коэффициент; H_a - твердость абразивной частицы.

В дальнейшем с учетом влияния свойств среды и размеров зерен абразивных частиц износ был описан выражением более сложного вида:

$$u = \mu \cdot \frac{H_a}{H_\mu} \cdot \frac{p \cdot A_a \cdot L}{E} \cdot \beta \cdot \rho \cdot \delta, \quad (4.25)$$

где u - массовый износ; μ - коэффициент трения; p - номинальное давление; A_a - площадь контакта; L - путь трения; ρ - плотность изнашиваемого материала; β - коэффициент, показывающий влияние среднего размера зерна крупной фракции



Р и с. 4.20. Шкала Мооса

на величину износа материала; δ - коэффициент, учитывающий влияние СОЖ на величину износа.

С учетом того, что в процессе изнашивания распределение поверхностных сил не меняется во времени, а время работы превышает начальный период приработки, А.С. Проников получил выражение для расчета скорости изнашивания в виде степенной функции:

$$J = k \cdot v_{\text{СК}}^m \cdot P^n, \quad (4.26)$$

где $v_{\text{СК}}$ - скорость скольжения; P – нормальная нагрузка; m, n - показатели степени.

Наиболее общее заключение трибологов, полученное на базе феноменологического подхода, состоит в том, что в общем случае:

износ пропорционален нагрузке;

износ обратно пропорционален твердости изнашиваемого материала;

скорость износа коррелирует со скоростью скольжения.

Тем не менее, хотя эмпирические модели не имели развития в современной трибологии, из-за простоты полученных формул они до сих пор используются в конкретных случаях в инженерных расчетах, в частности, при расчетах изнашивания абразивного, бурильного инструмента, почвообрабатывающих машин и др.

4.6.3. Концептуальный подход

Использование различных концепций в моделировании изнашивания привело к созданию полуэмпирических выражений, которые на протяжении последней четверти века составляют основную расчетную базу для проведения оценок изнашивания. Это связано, во-первых, с достаточной простотой использования полученных зависимостей и, во-вторых, с возможностью качественного и количественного анализа процесса изнашивания. В основу этих моделей, часто построенных на основе физических соображений с учетом теории размерностей, легли следующие предположения:

износ пропорционален пути трения;

износ пропорционален работе силы трения;

износ определяется физическими параметрами процесса и механическими свойствами материалов.

В.Д. Кузнецов под интенсивностью изнашивания J понимал величину износа детали или образца металла, приходящуюся на единицу работы трения:

$$J = \frac{V}{\mu \cdot P \cdot L}, \quad (4.27)$$

где V - износ материала твердого тела за время опыта; μ - коэффициент трения; P - нормальная нагрузка; L - путь трения.

Вследствие трудоемкости определения работы силы трения для расчета интенсивности изнашивания выражение (4.27) чаще используют в виде

$$J = J_0 \cdot \mu = \frac{V}{P \cdot L}. \quad (4.28)$$

Подобный характер имеет и уравнение для расчета изнашивания, полученное Арчардом:

$$U = k \frac{P \cdot L}{H}, \quad (4.29)$$

где k - коэффициент изнашивания; H - твердость.

Полагая, что изнашивание подобно малоцикловой усталости, Чаллен предложил использовать для анализа разрушения эмпирическое уравнение Мэнсона-Коффина и получил выражение для расчета коэффициента изнашивания:

$$k_1 = \frac{9 \times \sqrt{3} \cdot r \cdot \mu}{n \cdot \gamma_t} = \frac{9 \times \sqrt{3} \cdot r \cdot \mu}{C^D \cdot \gamma_t^{1-D}}, \quad (4.30)$$

где r - отношение пластической работы к полной работе трения; μ - коэффициент трения; n - число циклов до разрушения; C, D - константы материала; γ_t - приращение деформации за цикл нагружения.

Д.Г.Эванс и Д.К.Ланкастер предложили новый, более удобный вид уравнения изнашивания Д.Арчарда:

$$U = k \cdot P \cdot L, \quad (4.31)$$

где k - размерный коэффициент изнашивания, обычно записываемый в $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$.

Несмотря на столь широкое распространение данной модели практика ее использования указала на некоторые проблемы. В частности, до сих пор отсутствуют достаточно надежные способы оценки коэффициента изнашивания. Влияние различных комбинаций материалов, режимов работы, среды и т.д. часто приводит к большим расхождениям между результатами, полученными расчетным путем, и экспериментальными данными. Кроме того, применявшиеся методы экспериментальной оценки коэффициента изнашивания на стандартном лабораторном оборудовании типа «палец-диск» или «палец-плоскость» не отражают реальные условия работы различных пар трения при эксплуатации.

Наибольшее распространение в России имел подход к разработке модели и расчетных методик изнашивания, предложенный И.В.Крагельским. Его концепция, им же сформулированная, в лаконичной форме звучит следующим образом: **износ пропорционален объему взаимного внедрения шероховатостей $V_{\text{вв}}$.**

Эту концепцию иллюстрирует произвольное сечение контакта шероховатых трущихся тел на рис. 4.21.

Строго не рассматривая в деталях эту концепцию, отметим ее блестящую наглядность и убедительность.

В приведенной иллюстрации на рис. 4.21 можно однозначно перечислить, чем определится объем взаимного внедрения: свойства материалов, нагрузка, параметры шероховатости, смазка и др.

В соответствии с этой концепцией И.В. Крагельским предложено базовое уравнение изнашивания, которое пред-полагает усталостный механизм разрушения поверхностей, подобный малоцикловой усталости. Мерой воздействия в его подходе является число циклов нагружения n .

Кратко вывод основного уравнения И.В. Крагельского сводится к следующему.

Вводится понятие удельного износа:

$$i_n = \frac{\delta V}{A_r \cdot d} \quad (4.32)$$

Здесь i_n - объем изношенного материала при перемещении подвижной детали на расстояние, равное среднему диаметру пятна контакта d , в расчете на единицу ФПК и единицу пройденного пути. Поскольку $\delta V = \delta h \cdot A_r$, то $i = \delta h/d$, A_r - ФПК, δh - толщина изношенного слоя при указанном перемещении. При сдвиге на расстояние, равное среднему диаметру пятна, ФПК разрушается и снова восстанавливается. Поэтому на пути скольжения L площадь касания воспроизводится n раз, т.е.

$$n = L/d \quad (4.33)$$

К концу пути изношенный объем составит

$$\Delta V = \delta V \cdot n \quad (4.34)$$

Поскольку интенсивность изнашивания $J = \Delta V/LS$, то, приняв, что S - площадь трения равна контурной (A_c) или, если волнистость отсутствует, номинальной площади контакта (A_a), можно записать

$$J = \frac{\Delta V}{L A_a} \quad (4.35)$$

Составим отношение J/i с учетом формул (4.33, 4.34 и 4.35):

$$\frac{J}{i} = \frac{\Delta V \cdot d}{\delta V \cdot L} \cdot \frac{A_r}{A_a}$$

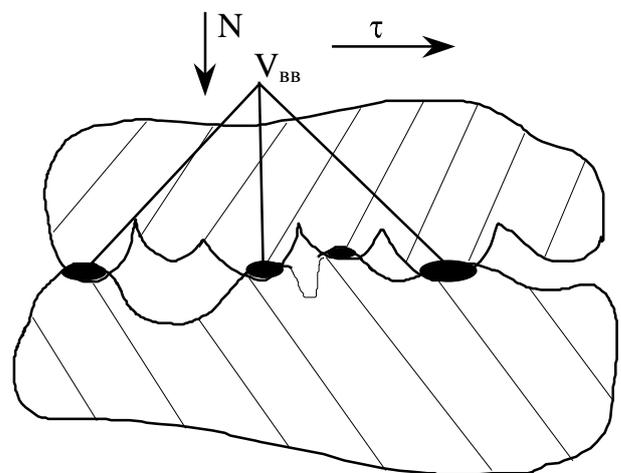


Рис.4.21. Схема взаимного внедрения выступов шероховатостей $V_{вв}$ в парах трения по И.В. Крагельскому

Однако в соответствии с формулами (4.33 и 4.34) $\Delta V / \delta V = L/d = m$. Поэтому

$$J = i (A_r/A_a). \quad (4.36)$$

Вычислим объем деформированного материала. Из формул (1.15) и (1.16) выразим площадь сечения шероховатого слоя на расстоянии a от верхней его границы (см. рис. 1.3,а):

$$A_s = A_{SO} \left(\frac{a}{R_p} \right)^v = n_{oa} \overline{\Delta A_s} A_a \left(\frac{a}{R_p} \right)^v. \quad (4.37)$$

Здесь, как было сказано раньше считается, что $A_s = A_a$. Деформированный объем материала

$$\Delta V_D = \int_0^a A_s \cdot da = \left(\frac{A_{so}}{R_p^v} \right) \int_0^a a^v da = \frac{A_{so}}{v+1} \frac{a^{v+1}}{R_p^v}. \quad (4.38)$$

Величина объема, отделившегося вследствие износа за одно нарушение фрикционной связи, составляет

$$\delta V = \frac{\Delta V_D}{m} = \frac{A_{so} a^{v+1}}{v+1} \frac{R_p^v}{m} = \frac{t_m R_p}{m} \varepsilon^{v+1} A_a. \quad (4.39)$$

Здесь $t_m = A_{so}/A_a$; $\varepsilon = a/R_p$; $A_r = \alpha A_s$. (см. формулы (1.4), (1.10), (1.11)).

Удельный износ

$$i = \frac{\delta V}{A_r \cdot d} = \frac{R_p \cdot \varepsilon}{\alpha \cdot m} \frac{1}{v+1} \frac{1}{d} = \frac{a}{\alpha \cdot m} \frac{1}{v+1} \frac{1}{d}. \quad (4.40)$$

Среднюю площадь сечения выступа, плоскостью удаленного на a от верхней границы шероховатого слоя, находят, используя формулы (1.5), (1.16), (4.37):

$$\overline{\Delta A_s} = A_s/n = \frac{A_{so} \cdot a}{n_0 \cdot R_p} = \frac{2\pi ga}{v}. \quad (4.41)$$

Если приближенно считать, что $\overline{\Delta A_s} \cong \pi d^2/4a$, то средний диаметр пятна контакта: $d = 2\sqrt{\alpha \overline{\Delta A_s}} \sqrt{\pi}$. Подставив в это выражение формулу (4.41), получаем

$$d = 2\sqrt{2\alpha} \cdot \sqrt{ga/v}. \quad (4.42)$$

С учетом (4.40), (4.42) удельный износ

$$i = \frac{\sqrt{v}}{2\sqrt{2\alpha}^{3/2} n} \frac{1}{v+1} \sqrt{\frac{a}{r}}. \quad (4.43)$$

Интенсивность изнашивания

$$I = \frac{a}{\alpha \cdot m} \frac{1}{v+1} \frac{1}{d} \cdot \frac{A_r}{A_a}. \quad (4.44)$$

Трудность использования формулы (4.44) заключается в необходимости определения критического числа циклов нагружения, приводящих к разрушению элемента поверхности m . Для этого было предложено использовать закономерность усталостного разрушения при циклическом растяжении. Этот закон описывается формулой Веллера:

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^t, \quad (4.45)$$

где σ_0 - напряжение, приводящее к разрушению при одном цикле нагружения ($n=1$); σ - действующее напряжение; m - число циклов, приводящее к разрушению (разрыву) стержня; t - показатель степени, изменяющийся в зависимости от свойств испытуемого материала в пределах от 3 до 14.

Напряжение связывается с фактическим давлением на контакте и коэффициентом трения соотношением

$$\sigma = k\mu\sigma_r = k\mu N/A_r .$$

Коэффициент $k = 3 \div 5$ в зависимости от природы материала.

Несмотря на недостатки, эти модели до сих пор представляют интерес, а методы оценки параметров этих моделей непрерывно развиваются, на что указывает ряд докладов, представленных на Международном трибологическом конгрессе 1997г. в Лондоне.

4.6.4. Металлофизический подход

Характерная особенность материала поверхностного слоя - наличие текстуры, вызывающей анизотропию его механических свойств, которая является следствием пластической деформации трением. Давно обнаружено, что прочность анизотропных материалов существенно зависит от направления приложения нагрузки, однако в трибологических исследованиях этот факт зачастую игнорировался. По существу, не известны модели, так или иначе учитывающие текстуру модифицированного материала поверхностного слоя. Объяснение эффекта анизотропии требует рассмотрения в области материаловедения. Кроме того, если ранние работы в этой области опирались на упрощенные представления о структуре материалов, то сегодня, как показано в этой главе, основным объектом изучения являются различные виды несовершенств - дефектов кристаллической решетки.

В настоящее время непосредственное использование экспериментальных данных микроанализа материала поверхностного слоя и аналитических оценок числа дефектов (число разорванных межатомных связей, глубина debris-слоя) можно встретить очень редко. Интересным является факт, отмеченный В.И. Владимировым, что разрушение материала поверхностного слоя наступает при достижении плотности дислокаций $0,5 \div 5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$, что позволяет принять эту характеристику как внутренний параметр усталостного изнашивания. Многие современные исследования отражают связь между повреждаемостью кристаллической решетки и

свойствами материалов на макроуровне. Однако в настоящее время не существует расчетных моделей изнашивания с параметрами, учитывающими характеристики кристаллической решетки.

Изучение структурных превращений при изнашивании является интересным и многообещающим в связи с интенсивным развитием кинетической и синергетической теорий, с позиций которых становится возможным установление связи между процессами, протекающими на разных масштабных уровнях.

4.6.5. Термодинамический подход

Интерес к микроскопическим актам образования дефектов обусловлен прежде всего тем, что между поведением материалов на микро- и макроуровнях существует тесная взаимосвязь. Установить эту связь можно на основе термодинамического подхода. Образование дефектов влечет за собой соответствующее изменение общего состояния поверхностного слоя, характеризуемого внутренней энергией и энтропией. Согласно термодинамике поверхностный слой можно рассматривать как открытую термодинамическую систему, способную обмениваться энергией и веществом с окружающей средой. Наличие сорбционных процессов на поверхности материалов делает их схожими с мембранами, но в отличие от обычных мембранных систем поверхностный слой обладает еще и объемными характеристиками и, следовательно, комплексом собственных характеристик. В рамках термодинамического подхода стало возможным пользоваться общими понятиями и использовать параметры состояния, пригодные для описания любых макроскопических систем, а также в удобной форме, через изменение термодинамических потенциалов, учитывать адсорбционные и другие эффекты. Применительно к описанию изнашивания были попытки установить уравнения состояния поверхностного слоя в виде общих уравнений баланса энергии или баланса энтропии. Это привело к созданию энергетических моделей, представлявших функциональную зависимость интенсивности изнашивания:

$$J = f(U, S, t, \dots), \quad (4.46)$$

где U - внутренняя энергия; S – энтропия; t - время.

В основу термодинамического подхода легли следующие идеи:

в поверхностном слое изнашиваемого материала можно выделить объем, находящийся в состоянии локального равновесия;

процессы трения и изнашивания могут быть описаны уравнениями энергетического баланса;

скорость изнашивания контролируется скоростью производства энтропии.

Изучению и разработке энергетических моделей были посвящены работы А.Д. Дубинина, Б.В. Протасова, В.А. Буфеева, Б.И. Костецкого, Ю.И. Линника, Л.И. Бершадского, Ю.К. Машкова, Б.М. Силаева, А.А. Полякова, А.А. Рыжова, Г. Польцера, Г. Пурше, Г. Фляйшера и др.

Уравнение баланса энтропии, записанное для локальной области, в которой применим принцип локального термодинамического равновесия, имеет вид (3.13).

Однако в этих моделях не был учтен тот факт что при деформации активируются самоорганизующиеся диссипативные процессы, в результате которых перед разрушением в деформируемом материале вместо ожидаемого хаоса и деградации наблюдаются высокоупорядоченные структуры, т.е. из системы непрерывно «откачивается» энтропия, образуемая в ходе накопления дефектов, и система самоупорядочится. Кроме того, известен факт, что на стадии исчерпания пластичности преимущественная роль отводится коллективным процессам, охватывающих масштаб больший, чем размеры локальных областей внутри дислокационных ячеек, учет которых в выражении (3.13) не предусмотрен. Изнашивание - сугубо неравновесно-необратимый процесс, описание которого скорее может быть получено не из уравнений баланса в рамках равновесной и неравновесной термодинамики, а из кинетической теории неравновесных процессов.

4.6.6. Кинетический подход

Опираясь на успехи, достигнутые в области изучения кинетики деформации и разрушения материалов, стало возможным говорить о наличии общей термоактивационной природы химических, механохимических и механических процессов, происходящих по схеме преодоления энергетического барьера. С позиции кинетической теории поверхностный слой рассматривается как тело, состоящее из множества структурных составляющих - кинетических единиц, в качестве которых могут приниматься атомы и молекулы вещества, т.е. элементы, совершающие тепловые колебания. При кинетическом описании явлений, происходящих по термоактивационному механизму, используются следующие предположения:

в основе механизмов накопления повреждений и усталостного разрушения поверхностного слоя лежат термоактивируемые кинетические процессы;

зависимость между скоростью изнашивания материала и внешними факторами устанавливается через его активационные параметры: энергию активации U_0 и структурно-чувствительный коэффициент γ :

$$I = f (U_0 , \gamma , \sigma , T, \dots) . \quad (4.47)$$

Расчетные модели, построенные на основе термофлуктуационных представлений, были проверены и нашли подтверждение в многочисленных экспериментах. Достоинством полученных феноменологических выражений является возможность их использования для любого напряженно-деформированного состояния материалов при описании процесса изнашивания. Разработке и исследованию кинетических моделей изнашивания посвящены работы М.А. Бартенева, Ю.Н. Дроздова, Д.Г. Громаковского, А.Г. Ковшова, Т.Ф. Куинна, И. Усуи, И.Д. Ибатуллина и др.

Впервые модели, основанные на зависимости Аррениуса-Журкова, использовались для анализа коррозионно-механических видов изнашивания, что объяснялось преимущественной ролью скорости химических реакций, протекающих на поверхности, в процессе образования частиц износа. Т.Ф.Куинн предложил следующее выражение для расчета коэффициента окислительного изнашивания:

$$k = dA \cdot \exp\left(-\frac{U}{R \cdot T}\right) / \xi^2 \cdot \rho^2 \cdot V, \quad (4.48)$$

где A - константа Аррениуса; U - энергия активации; R - универсальная газовая постоянная; T - абсолютная температура; V - скорость скольжения; d - длина контакта; ρ - плотность оксида.

Для расчета скорости изнашивания инструментов из углеродистой стали при высоких температурах (при размягчении металла) И.Усуи с сотрудниками получил выражение

$$\frac{V}{\sigma_t \cdot L} = w_0 \cdot \exp\left(-\frac{U}{k \cdot T}\right), \quad (4.49)$$

где V - изношенный объем; σ_t - нормальная нагрузка; k - коэффициент Больцмана; w_0 - константа.

Первая расчетная модель в России, построенная с использованием кинетических выражений для оценки интенсивности изнашивания полимеров и резин, была получена С.Б. Ратнером:

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{U_0 - \mu \cdot \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}\right), \quad (4.50)$$

где J_0 - константа изнашивания; U_0 - энергия активации разрушаемых связей; σ - напряжение; γ - постоянная, связанная со структурой материала; μ - коэффициент трения; $R \cdot T$ - энергия теплового движения. Отличием полученного выражения является выделение в эффективной величине энергии активации механической составляющей, выраженной вторым слагаемым. Однако физический смысл констант J_0 и γ и в этом случае не ясен.

Пример иной организации кинетической модели изнашивания, параметры которой отражают связь механических и физико-химических свойств материала с характеристиками микрогеометрии контакта и параметрами внешних воздействий, представлен А.Г. Ковшовым:

$$J = \frac{\varepsilon \cdot C_\mu \cdot k \cdot T \cdot \sigma_{\text{экв}} \cdot L}{\alpha \cdot h \cdot \sigma_B^2 \cdot A_a \cdot d}, \quad (4.51)$$

где ε - предельное относительное удлинение; C_μ - атомная теплоемкость; $\sigma_{\text{экв}}$ - эквивалентная нагрузка; d - диаметр элементарного пятна контакта; h - постоянная Планка; L - проскальзывание на контакте; α - коэффициент теплового линейного расширения; σ_B - предел прочности; A_a - номинальная площадь контакта. Эквивалентная нагрузка определяется из выражения

$$\sigma_{\text{экв}} = 3\tau = 3 \left[q_r \cdot \mu + 2 \cdot \pi \cdot A \cdot f \sqrt{\rho \cdot G} \right], \quad (4.52)$$

где ρ - плотность материала; G - модуль сдвига; q_r - фактическое давление в контакте; f , A - характеристики режима фреттинга, соответственно частота и среднегеометрическая амплитуда осцилляции в плоскостях контакта.

При этом механизм разрушения материала поверхностного слоя рассматривается как атермический, а его активационные параметры и скорость разрушения оцениваются аналитическим путем. При использовании приведенной расчетной модели изнашивания определенную сложность представляет оценка ее параметров для материала тонкого поверхностного слоя, модифицированного трением.

4.6.7. Синергетический подход

Исследования в области кинетики деформации показали, что активационные параметры при переходе определенных значений температур способны изменяться скачком. Причем было установлено, что каждое изменение параметров соответствует смене доминирующего диссипативного механизма. Впервые этот эффект был обнаружен Дорном при исследовании ползучести металлов, когда для различных механизмов деформации был получен спектр значений энергии активации. При трении было также установлено существование различных механизмов диссипации энергии. Объяснение этому эффекту можно дать на основе теории синергетики, согласно которой деформируемый материал поверхностного слоя может рассматриваться как функциональная система, которая в условиях непрерывного притока энергии извне начинает проявлять признаки живой материи: обнаруживаются эффекты памяти, наследственности, самоорганизации, фазовых превращений, реакции системы на изменения внешних факторов и т.д. Синергетический подход, развиваемый в трудах Д. Кайзера, И.А. Одингга, Н.А. Буше, В.С. Ивановой, Л.И. Бершадского, И.Ж. Бунина, А.Н. Назарова, И.И. Гарбара, Б.И. Костецкого и др., при моделировании изнашивания может состоять в выборе критериев устойчивости системы и установлении критических значений параметров модели, в которых система достигает точки бифуркации - неустойчивости, предшествующей смене диссипативного механизма.

Закончив на этом обзор основных существующих подходов к описанию физической картины процессов и явлений, протекающих при изнашивании, авторы исходили из предположения, что приведенные сведения позволят читателю понять и оценить новую модель изнашивания, которая стала возможной благодаря общему накоплению знаний в этой области, а также явилась результатом наших собственных исследований.

4.6.8. Системе понятий использованных при разработке новой кинетической модели изнашивания

Обращение к проблеме моделирования изнашивания естественно связано с использованием основополагающих в трибологии терминов и понятий. В наше время трибология интенсивно формируется как наука, создает свой понятийный аппарат и терминологию, однако можно отметить, что терминологическая практика в этой области оставляет желать лучшего. По многим источникам можно проследить, что любой автор по проблеме моделирования трения и износа вынуж-

жден оговаривать, на какое содержание терминов и понятий он будет ориентироваться.

В нашем случае, несомненно, основными при разработке моделей изнашивания являются понятия «трибосистема», «модель трибосистемы» и «узел трения». Рассмотрим практику применения этих терминов

Трибосистема. В работах Х. Чихоса встречаем понятие «трибомеханическая система» как технический объект и «триботехническая система» в качестве его модели. Чичинадзе А.В. и М. Хебда применяют термин «трибологическая система». Л.И. Бершадский узлы трения определяет как «полную (кинематическую) трибосистему», внутри которой выделяется ещё одна трибосистема, представляющая собой «возбужденную часть контактирующих материалов и среды».

Иначе говоря, существует объективная необходимость выяснения содержательной части этого понятия, поскольку нельзя ограничиться лишь его этимологией: «tribos»- трение и «sistema» - целое, состоящее из частей.

Отметим, что в научной и технической литературе машиностроительного профиля словообразования, содержащие термин «система», наиболее часто применяются для наименования компонентов сложных машин: «маслосистема двигателя», «система трансмиссии», система управления» и т.п. Очевидно, что для обсуждаемого термина в нашем случае такое применение не подходит.

В машиноведении широко используют словосочетания: динамическая, акустическая, термодинамическая и другие системы. Эти понятия предполагают системный анализ структуры соответствующих объектов и их аналитическое описание.

Можно отметить, что в трибологии тоже встречается применение понятия «трибосистема» для наименования некоторой совокупности механизмов по признаку наличия трения.

Сошлемся на публикацию Зиненко С.А., касающуюся этого термина. Автор отмечает, что трибосистема по существу является не только значительным, но и весьма сложным объектом, охватывает целый класс физических систем, наиболее общим признаком которых является относительное движение в контакте твердых тел.

В связи с отмеченным мы будем придерживаться содержания понятия **трибосистема** как совокупности связанных между собой механизмов (узлов трения), выполняющих заданные функции посредством относительного перемещения частей, сопровождаемого трением.

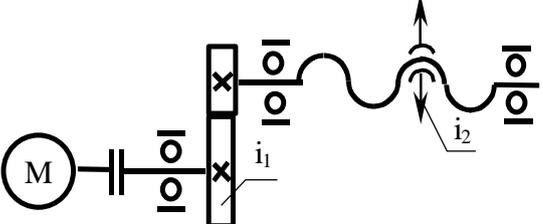
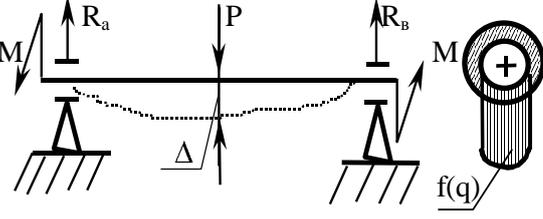
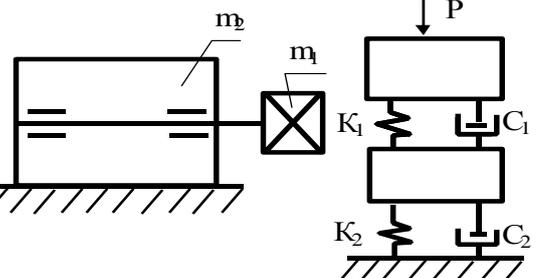
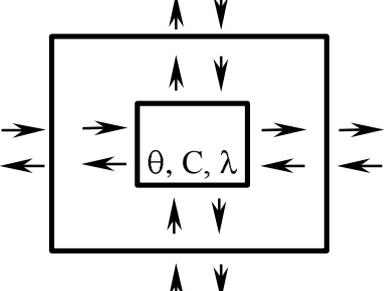
Модель. К практике использования в трибологии термина «модель», происходящего от латинского «modulos» - мера, образ ..., по всей видимости, комментарии не требуются, за исключением вопроса о его сопряжении с рассмотренным выше термином «трибосистема».

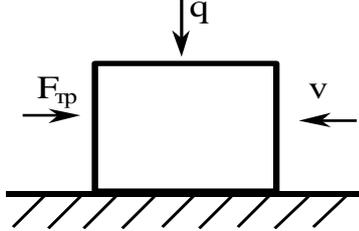
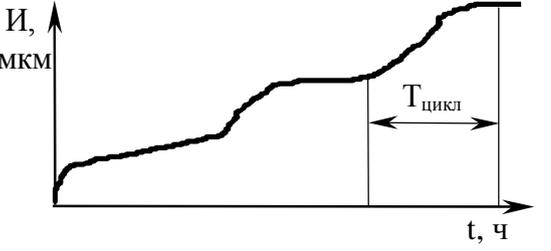
Термин «модель» в механике и машиноведении наиболее часто применяют в значении «описание». Представляется, что и понятие «модель трибосистемы» может быть определено как некоторая логико-математическая структура, имеющая систему переменных, соответствующих элементам трибосистемы. Изменениям реакций трибосистемы должны соответствовать изменения переменных мате-

матической модели. В связи с обсуждением термина «трибосистема» подчеркнем ещё одно обстоятельство. Многие явления, имеющие место при трении, исторически изучались внутри смежных научно-технических дисциплин: кинематики узлов трения, динамики, прочности и др. При системном анализе всё содержание этих дисциплин неизбежно должно быть привлечено для идентификации моделей трибосистемы. Пример подобной интерпретации модели трибосистемы приведен в табл. 4.4., где каждая подсистема иллюстрируется с помощью символики, принятой в соответствующих дисциплинах. Из табл. 4.4 видно, что упомянутые элементы трибосистемы могут быть классифицированы как её основные подсистемы.

Таблица 4.4.

Основные формы идентификации элементов трибосистемы

№ п/п	Наименование подсистемы	Схема	Математическое описание, основные параметры
1	Кинематическая подсистема, характеризует параметры двигателя		$J_{\text{общ}} = i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n,$ <p>где i_n - передаточное отношение кинематической цепи; М - двигатель</p>
2	Прочностная подсистема, характеризует силовое взаимодействие элементов трибосистемы		<p>P - сила; M - моменты; Δ - деформация; $\sigma = f(q)$ - контактное напряжение и др.; R_a и R_b - реакции опор</p>
3	Динамическая подсистема, характеризует динамику контактных взаимодействий элементов трибосистемы		<p>m_i - масса; P - возмущающая сила; K_i - контактная жесткость; C_i - демпфирование и др.</p>
4	Термодинамическая подсистема, характеризует теплоперенос в трибосистеме		<p>θ - теплообразование при трении; λ - теплопроводность; C - теплоемкость и др.</p>

5	Подсистема трения, характеризует силы, работу трения, контактную гидродинамику трения и др.		$F_{тр}, \psi = \varphi(v, q, T, \mu);$ $П_{см} = h/x; \mu = \mu_0 e^{\phi_0 - \alpha \Delta T},$ <p>где $F_{тр}$ - сила трения; ψ- гидродинамическое давление; μ- вязкость смазки; $П_{см}$ – безразмерный комплекс; v - скорость и др.</p>
6	Подсистема изнашивания (переноса), характеризует скорость диспергирования материала на поверхностях трения		$I = \xi П_p \lambda \left[t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \psi \sigma}{RT}\right) \right]$ <p>(обозначения см. в тексте)</p>

4.6.9. Процесс разработки и характеристика кинетической модели изнашивания

При разработке модели учитывалось, что в трибологии уже достигнуто понимание основ иерархии процессов деформации и разрушения поверхностей трением. В работе В.И. Владимирова утверждается, что «... адекватную картину поведения материала под внешним воздействием можно получить только из многомасштабных моделей».

Общепризнаны следующие масштабные уровни: микроскопический (атомные и дислокационные размеры), мезоскопический (кооперативные дислокационные эффекты в объемах с размерами сечений 0,1...3,0 мкм), структурный ($10^{-6} \dots 10^{-3}$ м) и макроуровень, на котором применимы методы теории упругости.

Экспериментальные результаты наших исследований и публикации других авторов свидетельствуют, что основные, наиболее существенные изменения в состоянии материала, деформируемого трением, ведущие к разрушению, происходят на мезоскопическом уровне. К этому уровню относятся микронеровности поверхностей (высотные характеристики), флуктуации полей напряжений при встречах микронеровностей, фрагментированные микрообъемы материала и др.

Сам разрушающийся поверхностный слой материала толщиной $\sim 0,1 \dots 3,0$ мкм тоже, как правило, за исключением грубых форм износа, имеет мезоскопический масштаб. Такой масштабный предел в физике и металловедении связывают с предельно возможной длиной пробега дислокаций.

Учитывая тенденции повышения энергетической напряженности машин (двигателей, конструкций, работающих при интенсивной вибрации, ударах и т.п.), исходили из того, что связь процессов, протекающих на мезоскопическом уровне с макропроцессами, реализуется через деформацию деталей узлов трения (что определяет форму пятна контакта), динамику контактных взаимодействий и локали-

зацию микрообъемов материала, деформируемого трением, связанную с дискретностью контакта шероховатых поверхностей.

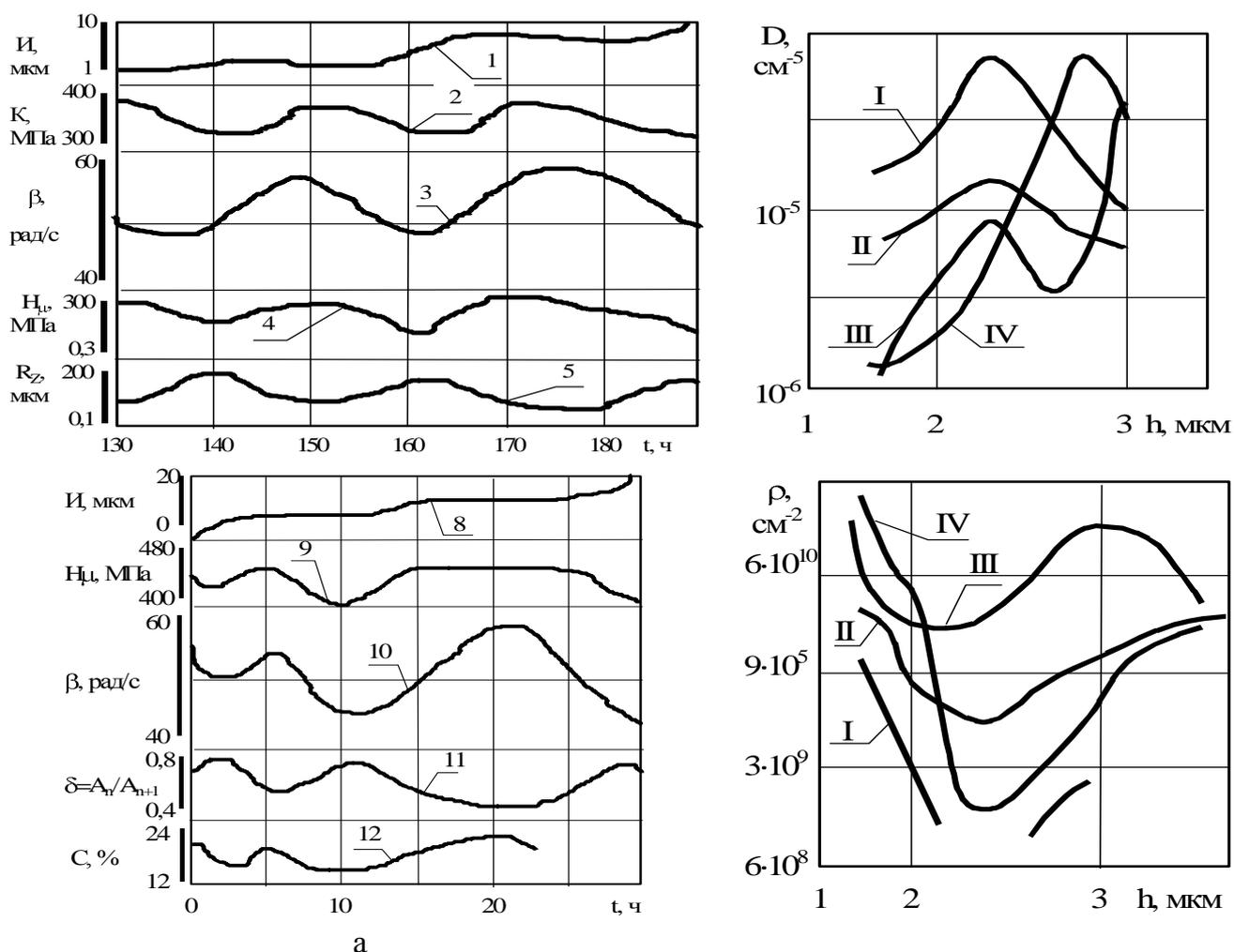
При разработке модели использовались представления микромеханики разрушения материалов и математический аппарат кинетической термофлуктуационной теории прочности.

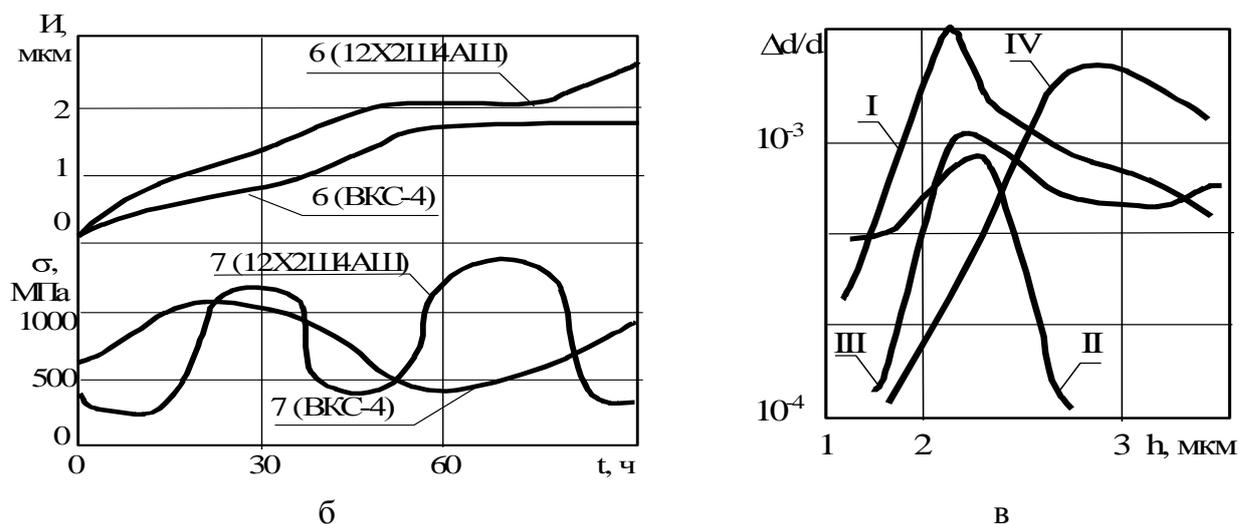
Основные положения предложенной нами модели изнашивания заключаются в следующем.

1. Модель описывает процесс превращения некоторого поверхностного микрообъема материала под действием трения в мелкодисперсные частицы износа. Результирующей характеристикой этого процесса является скорость изнашивания j_v ($M^3/ч$).

2. Конструкция модели подсказана изученным нами феноменом циклического отделения частиц износа при трении, что рассматривалось ранее.

3. Накопление повреждений локализуется в микрообъемах материала, ограниченного площадью ΣA_r и глубиной h , на которой находится зона наибольшей концентрации дислокаций и других повреждений материала, так называемый debris - слой (рис. 4.22,а). Качественно микрообъем материала, лежащий выше этого





Р и с. 4.22. Циклические изменения состояния материала, деформируемого трением: а - СЧ 21-40; б - конструкционные стали; в - сплав ВТ-9, перестройка состояния материала (сплав ВТ-9) по глубине от поверхности (I,II,III,IV - кривые, соответствующие наработке 10,14,20,26 ч.); г - циклы для сплава никеля (I - износ; 2 - контактная жесткость; 3 - физическое уширение рентгеновских интерференционных линий; 4 - микротвердость; 5 - шероховатость; 6 - износ двух марок стали; 7 - остаточные напряжения ; 8 - износ титанового сплава ВТ-9); 9 - микротвердость на ВТ-9; 10 - физическое уширение интерференционных линий; 11 - демпфирующая способность; 12 - содержание β-фазы; 13 - плотность дислокаций полученная методом ФМР [12]

слоя, характеризуется преобладанием накопления поврежденности над их релаксацией, что обуславливает необратимость его разрушения:

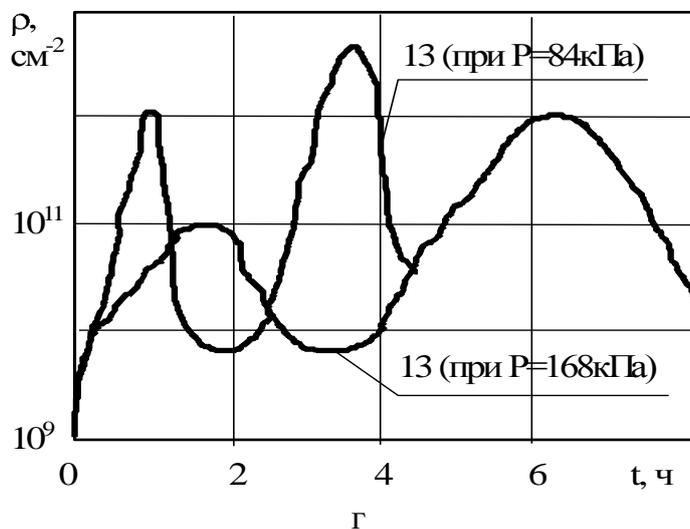
$$V_d = \Delta A_r \cdot n_r \cdot h \quad (4.53)$$

4. Разрушение каждого локализованного микрообъема материала при изнашивании имеет групповой характер и протекает за время охарактеризованного выше кинетического цикла «упрочнение → разрушение → разрушение → разрушение» (рис. 4.22,в).

При этом на первой стадии износ минимален ($J \rightarrow 0$), а накопление повреждений носит латентный характер. Длительность этой стадии обычно около 0,7 времени цикла. На второй стадии наблюдается быстрый рост отделения частиц износа. После удаления продуктов износа начинается новый цикл накопления поврежденности и разрушения на новой совокупности выступающих неровностей.

5. Для описания элементарного акта разрушения использованы представления кинетической термофлуктуационной концепции прочности, в которой долговеч-

продолжение рис. 4.22



ность (время существования единичной связи под нагрузкой) определяется известной формулой С.Н. Журкова:

$$\tau = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T}\right), \quad (4.54)$$

где t_0 - постоянная времени; U_0 - энергия активации разрушения межатомной связи при отсутствии внешних напряжений; γ - структурно-чувствительный коэффициент; k - постоянная Больцмана; T и σ - абсолютная температура и напряжение.

6. Общее число связей λ , разрушающихся в каждом микрообъеме материала V_d за один кинетический цикл, оценивается гипотетически с помощью ряда принятых упрощений. Так, форма частиц износа (рис.4.22,б) условно принята сферической. Такую же форму имеет элементарный активационный объем V_a . Число разрушаемых связей определяется по количеству межузлий единичной кристаллической решетки N_p с учетом отношения локализованного микрообъема материала V_d к объему среднестатистической частицы $V_{кр}$ и отношения поверхности частицы среднестатистического размера $S_{V_{кр}}$ к поверхности одного активационного объема S_{V_a} :

$$\lambda = N_p \cdot \frac{V_d}{V_{кр}} \cdot \frac{S_{V_{кр}}}{S_{V_a}}. \quad (4.55)$$

7. Общее время одного цикла τ , необходимое для разрушения микрообъема материала V_d , определяется на основе гипотезы линейного суммирования повреждаемости, при уточнении количественной стороны по экспериментальным данным (см. рис.4.22,в).

$$T_{ц} = \tau \cdot \lambda. \quad (4.56)$$

8. Изнашивание в расчетной модели измеряется средней скоростью диспергирования локализованного поверхностного микрообъема материала, $m^3/ч$, за время цикла:

$$J_v = \frac{V_d}{T_{ц}}. \quad (4.57)$$

С учетом требований размерности, характеристики релаксации повреждений Π_p , исходной повреждаемости материала ξ , а также диссипативности контакта (коэффициент поглощения ψ) соотношение (4.57) как базовое уравнение изнашивания представлено в виде

$$J_v = \frac{\Delta A_r \cdot n_r \cdot h}{\Pi_r \cdot \xi \cdot \lambda \cdot t_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \psi \cdot \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}\right)}. \quad (4.58)$$

Уравнение (4.58) является базовым для построения расчетных схем и методик прогнозирования скорости изнашивания конкретных триботехнических задач.

Приведем пример, в котором уравнение (4.58) было использовано для расчета изнашивания шлицшарнира основной стойки шасси самолета ТУ-134.

На рис. 4.22,г приведены результаты расчета, данные стендовых испытаний и эксплуатации шлицшарнира. Максимальная расчетная нагрузка в режиме пробега по взлетной полосе составляет 20,0 МПа, коэффициент динамичности - 1,7.

Разброс данных износа в эксплуатации по ряду аэропортов - поле между кривыми 1 - - 1¹ - связан с климатическими зонами и производственной культурой эксплуатации. Наибольший износ имели шарниры шасси самолетов северных линий, наименьшее - в аэропорту г. Рига.

Стендовые эквивалентные испытания (рис. 4.22,г) имеют существенно меньший разброс, что связано с исключением влияния эксплуатационных факторов (области рассеяния заштрихована).

Расчетная кривая 3 (полученная для режима оптимальной эксплуатации) приближается к данным из благоприятных авиапредприятий.

Предлагаемая методика расчета позволяет прогнозировать не только среднюю ожидаемую величину износа, но и его распределение по пятну контакта (см. рис.4.22,д).

При расчете изнашивания с интенсивными окислительными превращениями на поверхностях, когда разрушается не сам материал, а его вторичные структуры, например при фреттинг-коррозии, в формулу (4.58) необходимо вводить поправку $K_{кор}$ для структурно-чувствительного коэффициента γ :

$$\gamma_{кор} = \gamma \cdot K_{кор}. \quad (4.59)$$

Значение этой поправки зависит от концентрации кислорода C , поступающего в зону контакта. Концентрация кислорода по А.К. Дедкову уменьшается при удалении от кромки зазора:

$$\frac{d^2 C}{d^2 x} = \frac{K_1 - K_2 \bar{C}^m}{Z_2 D_d} ; \quad K_{кор} = \frac{C}{C_0}, \quad (4.60)$$

где $C(x)$ - находят из решения уравнения (4.60).

Гидродинамические эффекты при трении со смазочным материалом можно учитывать в соответствии с методологией Ю.Н. Дроздова. Используя общепринятые в контактной гидродинамике критерии подобия, влияние гидродинамики учитывали через коэффициент гидродинамического влияния $K_{гидр}$:

$$K_{гидр} = B_r - \left(\frac{\nu}{V \cdot R_a} \right), \quad (4.61)$$

где B_r - эмпирический коэффициент; ν - вязкость; V - скорость скольжения; R_a - высота шероховатостей.

Для учета теплового влияния на скорость изнашивания в уравнение (4.58) потребовалось внести поправку. Численное исследование уравнения в широком диапазоне температур (270...1000⁰К) показало, что с ростом температуры после

400К имеет место существенное отклонение расчетной скорости изнашивания от наблюдаемых значений.

Это связано с тем, что Больцманов множитель $A \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$, используемый в нашей модели, не может количественно характеризовать тепловые процессы в связи с высокой сложностью трибосистемы. Поэтому поправочный параметр K_T , устраняющий имеющиеся расхождения, был определен эмпирическим путем и представлен в виде степенной функции

$$K_T \approx A_T \cdot T^{3/4}, \quad (4.62)$$

где $A_T \approx 0,011$.

Последний комментарий к формируемой модели касается определения действующего напряжения σ .

Для этой цели были рассмотрены связи между подсистемами 2, 3, 5 и 6, приведенные в табл. 4.4.

Действующие на площадках фактического контакта напряжения включали в себя статическую компоненту $\sigma_{ст}$ (например, определяемую натягом или массой элементов конструкции), динамическую компоненту $\sigma_{дин}$, определяемую инерционными процессами (макродвижение, вибрации, удары) и волны напряжений $\sigma_{волн}$, генерируемые рабочим процессом и самим трением.

Как принято в расчетах деталей машин, динамические приращения контактных напряжений представляют с помощью коэффициентов динамичности:

$$\sigma_{действ.} = \sigma_{стат.} \cdot K_{вibr.} \cdot K_{волн.} \cdot \quad (4.63)$$

По нашей оценке (например, для шасси) можно принимать средние значения $K_{вibr.} \approx 1,20 \dots 1,35$, а $K_{волн.} \approx 1,1 \dots 1,25$.

1.21. Заключение

Если сравнить первую кинетическую модель изнашивания, предложенную С.Б. Ратнером, с тем, что представлено выше, то можно отметить следующее.

Во-первых, модель С.Б. Ратнера как бы переносит закономерность разрушения элементарной связи, описанной экспоненциальной функцией Больцмана, на макрообъем. Такое решение обосновать трудно.

В новой модели учтен масштабный фактор. Единичные связи (пучки связей) разрушаются на микроуровне (в пределах единичного активационного объема материалов), а частицы износа, которые принадлежат к мезоскопическому уровню, образуются при разрушении связей на их потенциальных (ожидаемых) поверхностях, как правило, по границам зерен материала. Величина же обычного износа (макроуровень) складывается из множества отделяющихся частиц.

Во-вторых, как это можно увидеть по изложенному выше, в модели учтен не только основной механизм разрушения, но и ряд наиболее существенных факторов, определяющих ход изнашивания: дискретность контакта, локализованный

микрообъем материала, динамика контактной нагрузки, вклад химических превращений и др. Такие схемы не содержат ни одно из известных уравнений изнашивания.

Применение предложенного уравнения для расчетных целей в контактных случаях может потребовать учета дополнительных обстоятельств, подобных приведенным примерам, но они могут быть реализованы расчетными методами.

Методика расчетов изнашивания (её общая схема) состоит в том, что последовательно выполняют следующие операции:

определяют нагрузку, действующую на узел трения;

определяют деформацию узла трения при действии этой нагрузки, площадь, форму пятна контакта и величину действующих контактных напряжений (для их определения используется метод объемных конечных элементов и соответствующее программное обеспечение);

на каждом из элементов разбиения площади контакта определяют фактическую площадь контакта A_f и фактическое давление P_f , изменяющиеся в зависимости от режима работы узлов трения, например, для авиационных изделий: запуск, прогрев, режим руления, взлет, набор высоты, крейсерский режим, посадка, торможение и т.п.

Изнашивание на каждой площадке разбиения $J_t = \varphi(\sigma_{ki})$, определяется с учетом этих режимов и их продолжительности согласно выражению (4.59).

При подобных уточнениях результаты расчетов дают неплохое совпадение прогноза и реального изнашивания.

В заключение отметим, что наиболее существенным во всей приведенной разработке, по нашему мнению, является то, что кинетический подход к моделированию изнашивания позволяет в удобной математической форме учитывать разнородные процессы различной природы (механические, химические, тепловые, акустические и др.), имеющие место при трении и разрушении поверхностей.

1.22. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы трибологии/Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Наука и техника, 1995. 774 с.
2. Машков Ю.К. Трибология конструкционных материалов. Омск: ОмГТУ, 1996. 299 с.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1989. 327 с.
4. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.
5. Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. Трение и смазка. - М.: Машгиз; 1960., 542 с.
6. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.
7. Дубинин А.Д. Энергетика трения и износа деталей машин. М.Киев: МАШГИЗ, 1963. 139 с.
8. Иванова В.С., Терентьев В.Ж. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 456 с.
9. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ш., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 338 с.

10. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. М.: Изд. АН СССР, 1960. 351 с.
11. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
12. Крагельский И.В., Добычин Н.М., Камбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
13. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. М.: Наука, 1979. 118 с.
14. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 591 с.
15. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Ленинград.: Химия. Ленинград. отделение, 1972. 240 с.
16. Аксенов А.Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях. М.: Машиностроение, 1977. 152 с.
17. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. М.: Машиностроение, 1979. 263 с.
18. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Гинсбург А.Г., Игнатьева З.В. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар. М.: Наука, 1979. 267 с.
19. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев.: Техника, 1974. 270 с.
20. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 223 с.
21. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. М.: Металлургия, 1976. 176 с.
22. Ханин М.В. Механическое изнашивание материалов. М.: Изд. стандартов, 1984. 152 с.
23. Fleischer G., Groges H., Thum H. Verschleiß und Zuverlässigkeit.
24. Veb Verlag Technik. Berlin, 1980. 244 p.
25. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания//Трение и износ. 1997. Т.18. № 1.

ГЛАВА 5

ТРИБОТЕХНИКА

1.23. 5.1. Характерные узлы трения транспортных машин

Основные агрегаты транспортных машин являются узлами трения. Одни из самых древних пар трения - колесо-грунт и его ступица-ось. Самые точные и тонкие устройства среди трущихся пар - это топливная и газораспределительная аппаратура двигателей внутреннего сгорания. В сложнейших условиях работают узлы трения цилиндрико-поршневой, шатунной группы, коленчатый вал с коренными и шатунными подшипниками, коробки скоростей, редукторы, ременные, цепные передачи и т.д.

Надежность и эффективность транспортных машин во многом определяются совершенством узлов трения: приводных двигателей, трансмиссии и колесных пар.

5.1.1. Основные узлы трения и изнашивание в двигателях внутреннего сгорания

Конструкция узлов трения двигателей внутреннего сгорания (ДВС) должна максимально удовлетворять требованиям повышения ресурса работоспособности, надежности, экономичности расходования топлива и масел, увеличения удельной агрегатной мощности, простоты обслуживания, условиям экологической безопасности и др.

Несмотря на особенности двигателей легковых и грузовых автомобилей, железнодорожных тепловозов, тракторов, судовых и других двигателей, основные узлы трения имеют общую основу конструкции и характерные триботехнические показатели.

Цилиндро-поршневая группа (ЦПГ) является основным и важнейшим из узлов трения ДВС. Внутренняя поверхность цилиндра, днище поршня и крышка образуют камеру сгорания. Боковая поверхность (зеркало цилиндра) служит направляющей для движения поршня.

Поршни ДВС, являясь подвижным элементом пары трения, работают в условиях высоких механических и тепловых нагрузок.

Блоки цилиндров обычно выполняют как коробчатую конструкцию с отверстиями для цилиндрических гильз и каналов охлаждающей среды.

По конструкции гильзы подразделяют на "мокрые", омываемые снаружи охлаждающей жидкостью, и "сухие", имеющие небольшую толщину стенок (2-4 мм), что позволяет без больших расходов применять качественные износостойкие материалы.

В большинстве дизелей для изготовления гильз используют высокопрочный легированный чугун. Основные типы поршней и сведения об их тепловой нагруженности приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

Характеристика тепловой напряженности поршней

Тип поршней	Комплексная характеристика тепловой напряженности (условная единица)
Неохлаждаемые чугунные:	4
из алюминиевых сплавов	6
Охлаждаемые:	
с опрыскиванием ребренного днища маслом	6,6-6,8
с циркуляционным масляным охлаждением	8
с инерционным масляным охлаждением (взбалтываемым маслом)	10

Конструкция поршня определяется силовыми, температурными и триботехническими факторами.

По высоте поршень делят на три основных пояса: жаровой, уплотнительный, несущий компрессионные и маслосъемные кольца и направляющий пояс.

От поршня требуется повышенная стойкость к износу рабочих поверхностей кольцевых канавок (особенно для первого поршневого кольца) и к задирам.

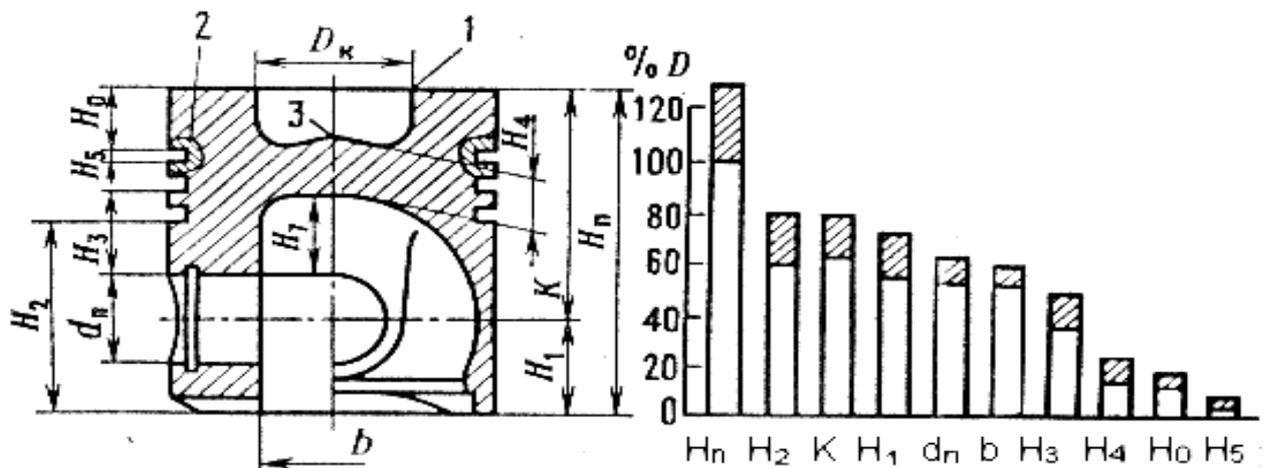
Диаметр поршня определяют из мощностных характеристик ДВС, а высота поршня связана с функциональными и конструктивными особенностями.

Прежде всего, высота поршня определяется числом компрессионных и маслосъемных колец, высотой H_0 жарового и H_2 направляющего пояса в котором расположено отверстие под поршневой палец диаметром d_n . Поршни дизелей имеют большую относительную высоту $H_n/D = 1,16 \div 1,54$ по сравнению с поршнями карбюраторных двигателей, у которых $H_n/D = 0,9 \div 1,3$. Это связано с тем, что в дизелях устанавливают большее число компрессионных и маслосъемных колец, задают большую высоту жарового и направляющего поясов и более толстые межкольцевые перемычки. Число колец зависит также и от частоты вращения коленчатого вала двигателя, уменьшаясь с ростом последней.

Связь диаметра и других характеристик поршня показана на рис. 5.1 на примере поршня автомобильного дизеля из алюминиевого сплава. Обозначения на графике иллюстрирует чертеж поршня.

Обозначения на графике показаны на чертеже, D-диаметр поршня.

Характерные особенности изнашивания цилиндра-поршневой группы заключаются в следующем.



Р и с. 5.1. Размерные характеристики поршня

Имеет место неравномерность распределения нагрузки и износа в контакте колец и юбки поршня, что создает искажение его цилиндричности. Износ в зоне 1-го кольца обычно больше, чем в других местах; юбка поршня в поперечном сечении приобретает форму эллипса.

Дополнительная неравномерность распределения нагрузки в трущихся контактах связана с неравномерным тепловым расширением поршня, имеющего распределения массы, и тепловой деформацией блока цилиндров.

Важной причиной неравномерности распределения контактных нагрузок является неточность размеров и формы цилиндра, поршня, колец и их элементов, сборочные отклонения взаимного расположения и др.

Износ поршневых колец при работе двигателя обусловлен их одновременным перемещением в продольном и радиальном направлениях относительно канавок. Направление, интенсивность перемещений и износа поверхностей определяет соотношение между силами инерции и упругости колец, силами трения о поверхности канавок поршня и гильзы цилиндра, давление газов в закольцевом пространстве.

Гильзы цилиндров изнашиваются неравномерно как по образующей, так и по окружности в поперечном сечении. Пик износа по образующей располагается в месте остановки компрессионного кольца в верхней мертвой точке. Это связано с увеличением силы трения при замедлении, остановках и реверсе; ухудшением условий смазки; смывом масла конденсатом паров топлива со стенок гильзы; наличием высоких нормальных давлений на стенки гильзы в момент изменения ориентации поршня в зоне верхней мертвой точки; испарением граничных слоев смазки под действием высоких температур, нарушением гидродинамического режима смазки в "мертвых точках" и др. Гидродинамический режим смазки в паре кольцо-гильза возможен лишь в средней части хода поршня.

Зона наибольшего износа по окружности в поперечном сечении обычно располагается в стороне, противоположной впускному клапану, что связано с поступлением в эту зону горючей смеси с абразивными частицами.

Наибольший износ гильз наблюдается в плоскости, перпендикулярной к оси вала, что связано с характером деформаций поршня, гильзы и действием нормальной нагрузки.

Поршневые кольца также изнашиваются по торцам и в радиальном направлении. Износ по торцам связан с перемещением колец в радиальном направлении под действием газовых сил и переориентацией поршня при смене направления движения.

Износ колец в радиальном направлении происходит вследствие трения под давлением газов в закольцевом пространстве и сил упругости колец. Наибольшему износу подвержены первые компрессионные кольца, работающие при высоких давлениях и температурах, при недостаточной смазке.

Маслосъемные кольца работают в более благоприятных условиях, однако их давление на стенки цилиндров от сил упругости в $2 \div 4$ раза превышает давления компрессионных колец, что определяет их повышенный износ и потерю способности сбрасывать излишки масла со стенок цилиндров.

Ресурс работоспособности поршня, как правило, лимитируется износом канавки под верхнее компрессионное кольцо, возникающим под действием относительных перемещений кольца.

Интенсивность изнашивания поверхностей юбки поршня, поршневых пальцев и внутренних поверхностей бобышек поршня невелика. Эти износы, как правило, не лимитируют долговечность ЦПГ.

Весомым фактором, определяющим вид и скорость изнашивания в цилиндропоршневых парах, является механохимические процессы на поверхностях трения.

Рабочий процесс в двигателях сопровождается образованием паров воды, двуокиси углерода и других соединений, которые взаимодействуют с продуктами окисления серы, что создает серную или сернистую кислоту. Происходит также образование азотной и угольной кислот, которые инициируют процессы электрохимической коррозии. В случае применения современных высококачественных масел с дополнительным удалением серы ведущая роль переходит к абразивному виду изнашивания, что, в свою очередь, ставит проблему улучшения очистки масла от механических примесей.

Узлы трения шатунов, крейцкопов и подшипников коленчатых валов входят во вторую, особенно высоко нагруженную и ответственную группу изнашивающихся деталей ДВС, характерную использованием подшипников скольжения.

В подшипниках поршневой и кривошипной головок шатунов, а также коренных подшипниках коленчатых валов с целью обеспечения высокой износостойкости наиболее часто применяют бронзовые (Бр ОФ 7.0-0.2), латунные или биметаллические втулки. В последнем случае антифрикционный слой изготавливают на основе свинца, олова и меди, например, сплав СОС-6-6 (сурьма, олово, металлокерамические включения).

Смазка в зону трения подается по внутренним каналам в теле шатунов или шатунных шеек.

Износ коренных и шатунных подшипников обусловлен действием ряда порой непреодолимых факторов.

Один из главных - невозможность поддержать гидродинамический режим трения при пусках и остановках, мгновенных перегрузках, что связано с разрывом масляного клина, снижением вязкости масла в случаях перебоев подачи масла и др. Другой фактор связан с наличием в масле абразивных частиц. Однако износ происходит и при нормальной работе в гидродинамическом режиме, так как локальное давление в масляном клине в $2,5 \div 3$ раза превышает среднее давление, вызывает деформацию и накопление усталости в приповерхностных слоя материала подшипников.

Соотношение износа коренных и шатунных подшипников различно и зависит от величины нагрузки. Так, например, в однорядных двигателях нагрузки на шатунные шейки больше, чем на коренные, и износ их выше.

У V-образных двигателей большие нагрузки приходятся на коренные подшипники. В результате этого износ коренных шеек и вкладышей в $1,5 \div 2$ раза больше, чем шатунных. Износ шеек неравномерен по окружности, что связано с недостаточной жесткостью коленвалов, а также с наличием противовесов. У всех двигателей в коренных подшипниках нижние вкладыши изнашиваются больше верхних, а в шатунных подшипниках верхние вкладыши изнашиваются больше нижних. Износостойкость вкладышей определяется жесткостью конструкции, формой расточки, схемой подвода масла, качеством масла, антифрикционными свойствами материалов и т.д. Отклонения макрогеометрии шеек, деформации вкладышей и узла под нагрузкой также вызывают локальное нарушение гидродинамического режима смазки, резкое повышение температуры, в результате чего интенсифицируется изнашивание и возможен задира, сопровождающийся выплавлением антифрикционного слоя.

Однако неравномерность распределения давления в подшипниках является конструктивно обусловленной, что иллюстрирует рис. 5.2,а.

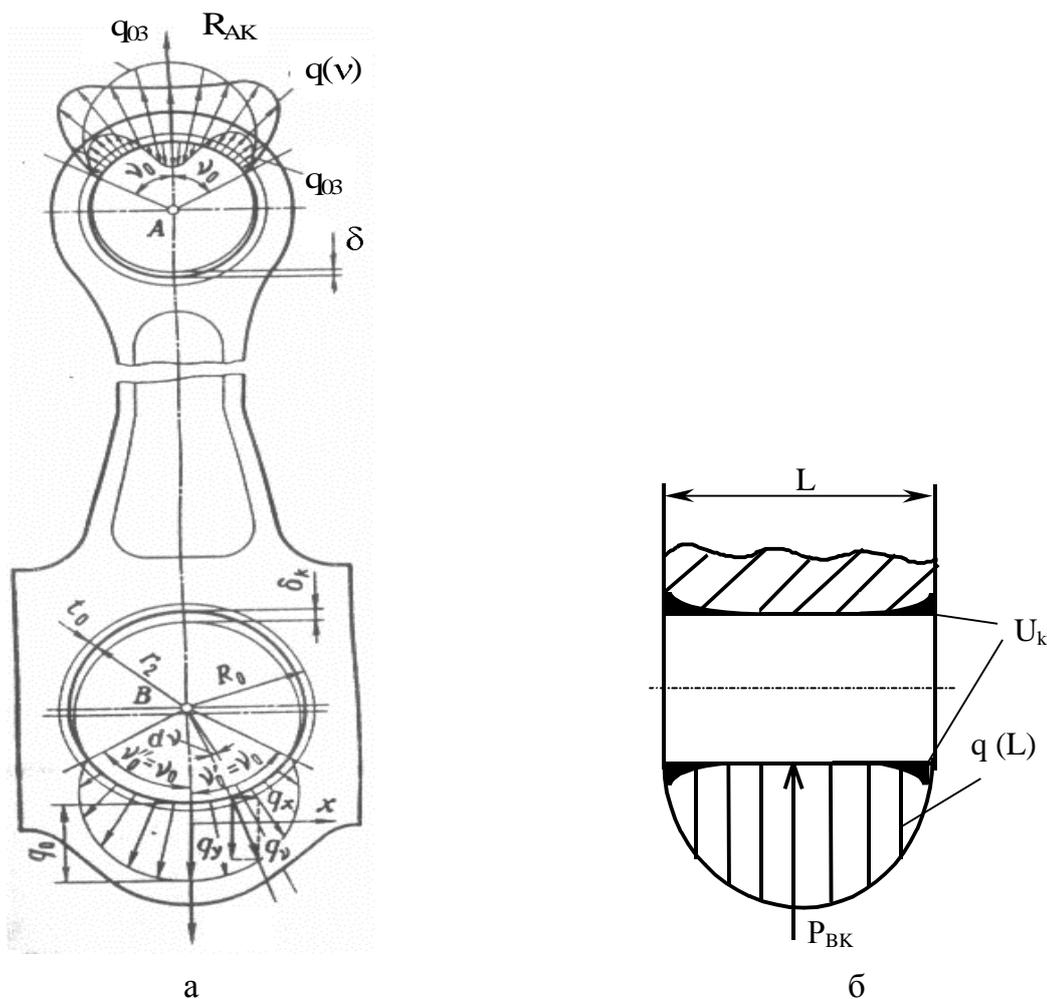
Здесь R_{AK} и R_{BK} – усилия, действующие на подшипник; $q(\nu)$, q_{01} , q_{02} , q_{03} , q_y – эпюры давлений в функции угла контакта ν ; δ – средний зазор в подшипнике; R_0 и r_2 – радиусы подшипника и шипа.

По оси шипа эпюры давления тоже нелинейны и определяется формой пятна контакта после приработки пары. Наиболее часто она имеет форму, приведенную на рис. 5.2,б, где U_K – кромочные износы.

Характер износа шатунных шеек коленчатого вала показан на рис. 5.3.

С целью обеспечения прочности и износостойкости коленчатые валы и шатуны изготавливают ковкой, штамповкой или отливкой из высокопрочных марок стали или чугуна.

Применение валов из углеродистых сталей для двигателей малой и средней напряженности объясняется сравнительно низкой стоимостью и хорошими пластическими свойствами этих сталей.



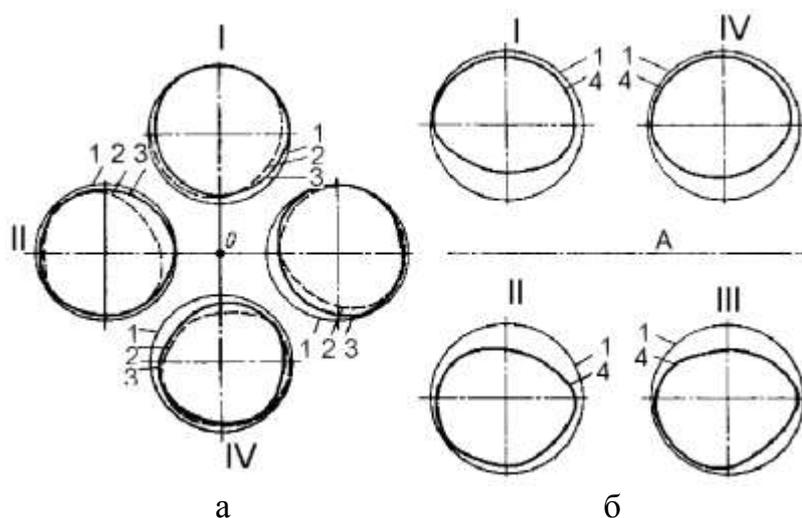
Р и с. 5.2. Распределение давления в подшипниках головки шатуна

Для валов стационарных, судовых и тепловозных двигателей чаще применяют стали 35, 40, 50, 35Г, 40Г, 45Г, 50Г и др. Валы быстроходных двигателей изготовляют из тех же сталей, а также из хромовых, хромоникелевых и хромомолибденовых (40Х, 40ХН, 35ХМ, 30ХН2МА, 18Х2Н4МА и др.). Для валов автомобильных и тракторных двигателей применяют стали 45, 50Г, 40Х, 45Г2, 38ХГН, 40ХН2МА.

Хромованадиевые, хромомолибденовые, хромоникелевые и хромоникельмолибденовые стали (30ХМА, 20ХН3А, 38Х2МЮА, 40Х2Н2МА, 25Х2Н4МА, 38Х2МЮА и др.) служат для изготовления коленчатых валов быстроходных дизелей повышенной мощности различного назначения, в том числе поршневой авиации, судов на подводных крыльях и др.

В судовых, стационарных, тепловозных и автотракторных двигателях нередко применяют литые коленчатые валы из специального модифицированного чугуна с шаровидным графитом (СЧ 30, СЧ 35 и др.) перлитно-ферритной структуры и из углеродистой и легированной сталей.

Изготовление литых чугунных валов проще и экономичнее, при этом расходуется меньше металла и меньше времени затрачивается на обработку, чем при изготовлении стальных штампованных или кованных валов. Причем износостойкость



Р и с. 5.3. Характер износа шатунных шеек коленчатого вала двигателя:
а – автомобиля ЗИЛ - 130; б - автомобилей "Москвич"; I - IV - номера шеек; А - ось коленчатого вала; 1 - линия отсчета; 2 - профиль изношенных шеек под первым, вторым, третьим и четвертым шатунами" 3 - профиль изношенных шеек под пятым, шестым, седьмым и восьмым шатунами; 4 - профиль изношенных шатунных шеек.

шеек вследствие наличия в чугуне графита возрастает, надежность работы вала благодаря большой циклической вязкости чугуна повышается.

При применении сплавов цветных металлов для подшипников шейкам придают высокую твердость термообработкой. Термообработку применяют для повышения износостойкости также и в случаях заливки подшипников баббитом.

Характерным является изнашивание контактирующих пар газораспределительного механизма: кулачок-толкатель, клапан-седло, стержень клапана-направляющая втулка, подшипники распределительного кулачкового вала. В особо тяжелых условиях работают пары кулачок-толкатель и клапан-седло, износ которых лимитирует долговечность механизма газораспределения. Причиной износа пары выпускной клапан-седло является высокотемпературная газовая коррозия под воздействием агрессивных компонентов продуктов сгорания рабочей смеси, а также биения клапана относительно седла, вызванные износом направляющей втулки клапана.

Износ этого сопряжения приводит к нарушению его герметичности и прогоранию клапана.

Для отвода тепла и снижения температуры выпускного клапана на форсированных двигателях применяют натриевое охлаждение. Для обеспечения равномерного износа седла и уплотняющего пояса клапана предусматривают конструктивные меры по проворачиванию клапана во время работы двигателя. На износ сопряжения клапан-седло влияет также величина регулировочного зазора. С увеличением зазоров возрастает динамичность посадки клапана в седло и ускоряется износ.

Для изготовления седел клапанов применяют сплавы на основе никеля ЭЩ-616, высокохромистые стали, аустенитный чугун, хромистый и хромоникелевый высокопрочный чугун и др. На дополнительные фаски клапанов наносят покрытия из высокопрочных антикоррозионных сплавов.

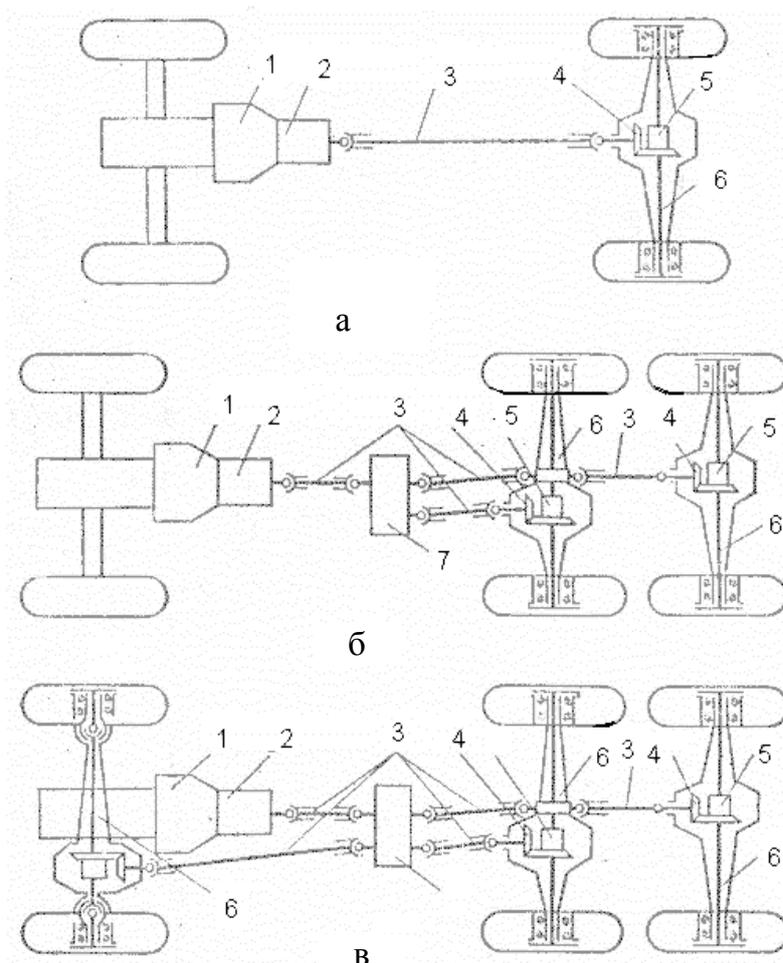
Направляющие втулки клапанов изготавливают из металлокерамики, стали, чугуна.

Пара кулачок-толкатель работает при контактных давлениях 1200 ~ 1700 МПа и скоростях скольжения 2-5 м/с. Износ деталей рассмотренных пар сопровождается усталостным выкрашиванием (питтинг) и задирами.

Износ кулачков и толкателей приводит к сокращению времени отсечки клапанов и снижению мощностных и экономических показателей двигателей.

5.1.2. Агрегаты шасси, трансмиссии и рулевого управления

Трансмиссия автомобилей традиционно содержит сцепление 1 (см. рис. 5.4,а), коробку передач 2, карданный вал 3, главную передачу 4, дифференциал 5 и полуоси 6. На автомобилях с двумя и более ведущими мостами (см. рис. 5.4,б,в) устанавливается, кроме того, раздаточная коробка 7, увеличивается количество карданных передач, а каждый ведущий мост имеет свою главную передачу и дифференциал.



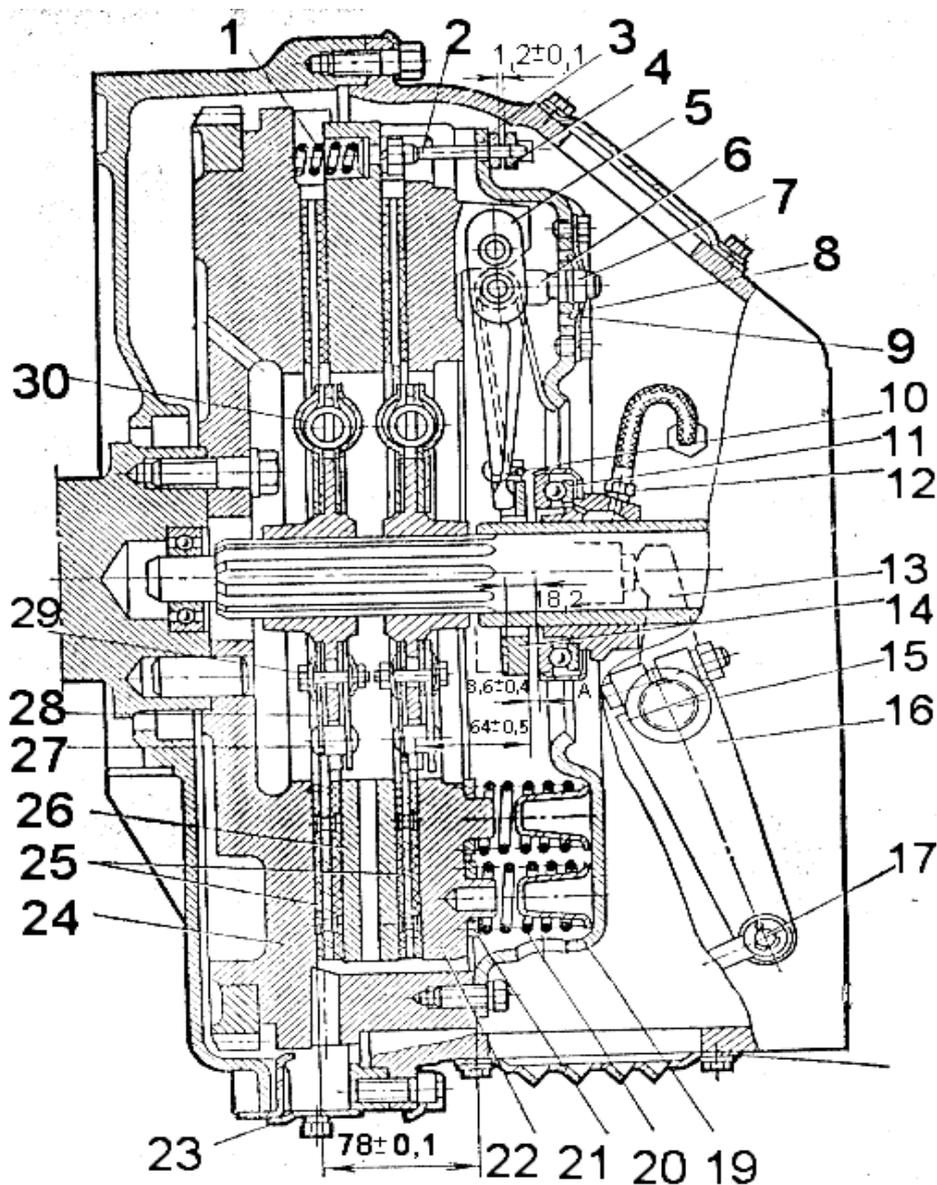
Р и с. 5.4. Схемы трансмиссий автомобилей:

а - с одним ведущим мостом (МАЗ - 500А, МАЗ - 5335); б - с двумя ведущими мостами (КрАЗ - 257); в - с тремя ведущими мостами ("Урал-375Д)

СЦЕПЛЕНИЕ, как правило, имеет фрикционный принцип действия, когда ведомый и ведущий диски передают крутящий момент за счет сил сухого трения.

Износостойкость материала дисков сцепления определяет ресурс работоспособности этого механизма. Один из видов отказов сцепления - попадание смазки на поверхность дисков.

Пример конструкции механизма сцепления приведен на рис. 5.5.



Р и с. 5.5. Сцепление автомобилей МАЗ-500А, МАЗ-5335:

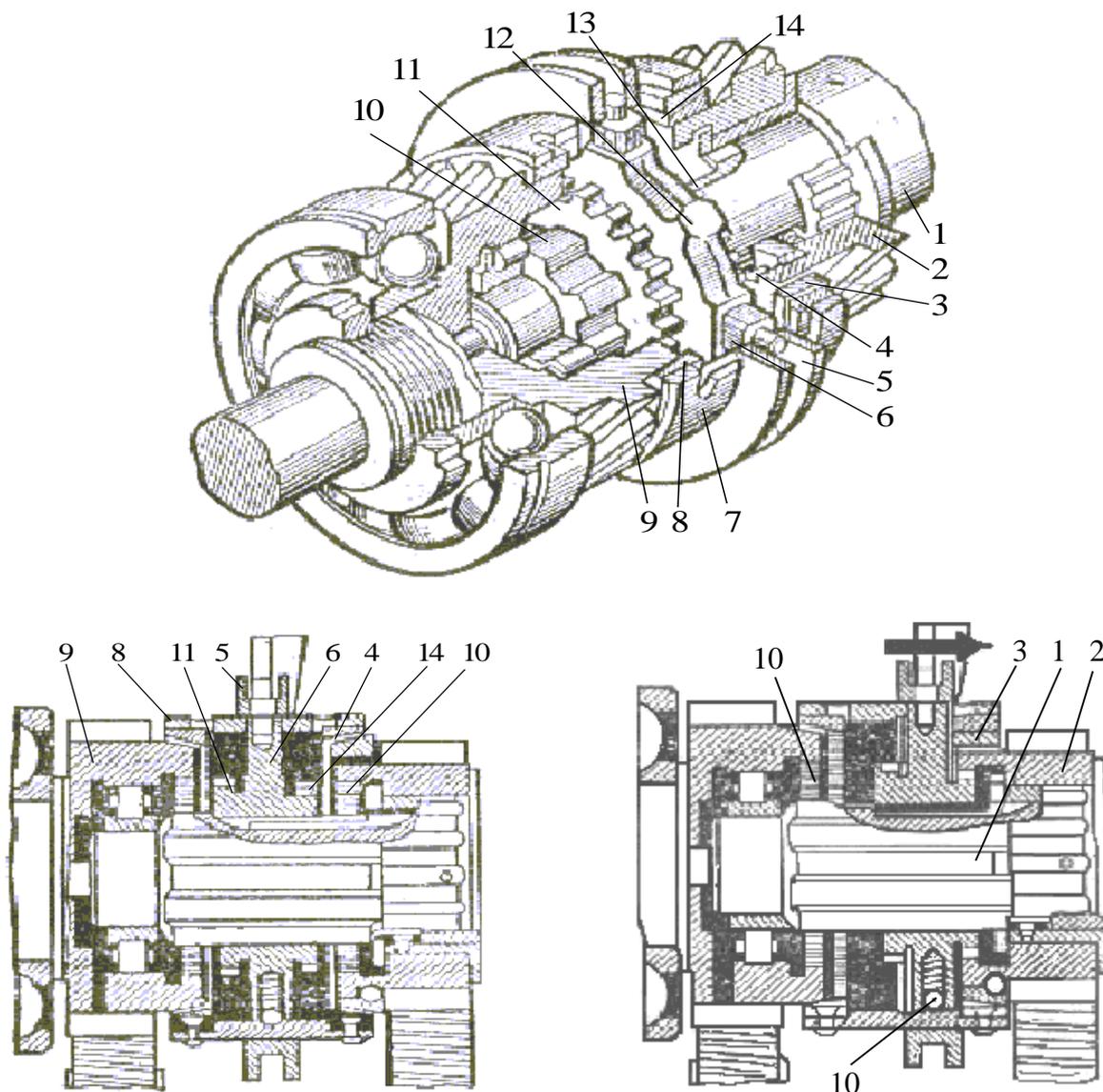
- 1 - отжимная пружина; 2 - шток; 3 - кольцо; 4 - планка; 5 - оттяжной рычаг; 6 - вилка оттяжного рычага; 7 - регулировочная гайка; 8 - опорная пластина; 9 - стопорная пластина; 10 - пружина оттяжного рычага; 11 - муфта выключения с подшипником; 12 - шланг для подвода смазочной муфте; 13 - вилка; 14 - упорное кольцо оттяжных рычагов; 15 - вал вилки выключения; 16 - рычаг; 17 - палец; 18 - крышка люка картера сцепления; 19 - кожух сцепления; 20 - нажимная пружина; 21 - теплоизоляционная прокладка пружины; 22 - нажимной диск; 23 - крышка люка картера маховика; 24 - маховик; 25 - ведомые диски; 26 - средний ведущий диск; 27 - упорный штифт; 28 - диск гасителя крутильных колебаний; 29 - фрикционные пальцы; 30 - пружина гасителя

Механизм сцепления может иметь рычажное (механическое) устройство или устройство с пневматическим усилителем включения сцепления, который сам является сложным узлом трения.

Коробка передач преобразует крутящий момент по величине и направлению. Как правило, применяют ступенчатые 4 или 5 скоростные коробки передач.

Основными парами трения здесь являются зубчатые пары, подшипники качения и механизм синхронизации скорости переключаемых пар зацепления.

Одна из конструкций синхронизатора грузовых автомобилей приведена на рис. 5.6.



Р и с. 5.6. Синхронизатор:

а – общий вид устройства; б - схема работы

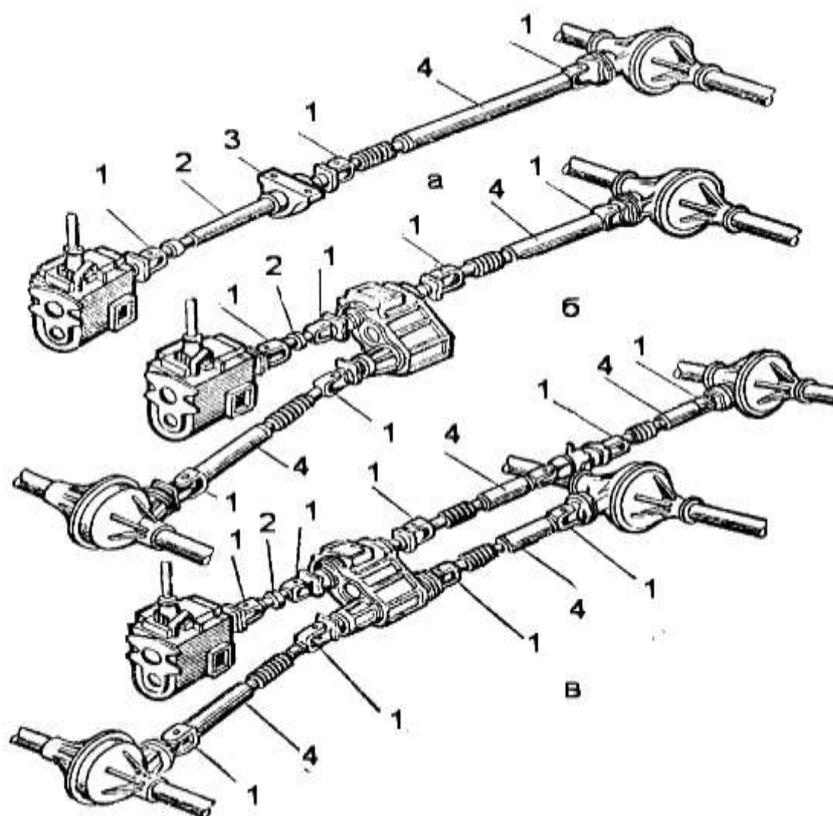
1 - вторичный вал коробки передач; 2 - шестерня пятой передачи; 3, 8 - конусные кольца синхронизатора; 4 - конусное кольцо шестерни пятой передачи; 5 - муфта включения четвертой и пятой передач; 6 - каретка синхронизатора; 7 - корпус; 9 - первичный вал коробки передач; 10, 13 - зубчатые муфты синхронизатора включения четвертой и пятой передач; 11, 14 - зубчатые муфты; 12 - шарики фиксатора

В этой конструкции перед включением передачи вилка рычага переключения перемещает муфту 5 и бронзовые конусные кольца 3 и 8 до соприкосновения с коническим выступом переключаемой шестерни. За счет сил трения она начинает вращаться, а при выравнивании скоростей происходит переключение муфты. В этом механизме важны и фрикционные свойства конической пары и их износостойкость.

Карданная передача представляет собой механизм, состоящий из одного или нескольких карданных валов и шарниров (рис. 5.7.). Карданные шарниры (шарниры Гука) и карданные (игольчатые) подшипники унифицированы. В тяжелых машинах кардан может иметь раздаточную коробку и промежуточные опоры, как это показано на рис. 5.7. Шарниры и подшипники карданов являются наиболее уязвимыми элементами системы, требуют качественной смазки, тщательного обслуживания и регулировки.

В случае заднеприводной конструкции наиболее нагруженным механизмом ходовой части является задний мост (рис. 5.8). Ведущий мост выполняет функцию увеличения крутящего момента двигателя и передачи его на полуоси под углом 90° к продольной оси автомобиля.

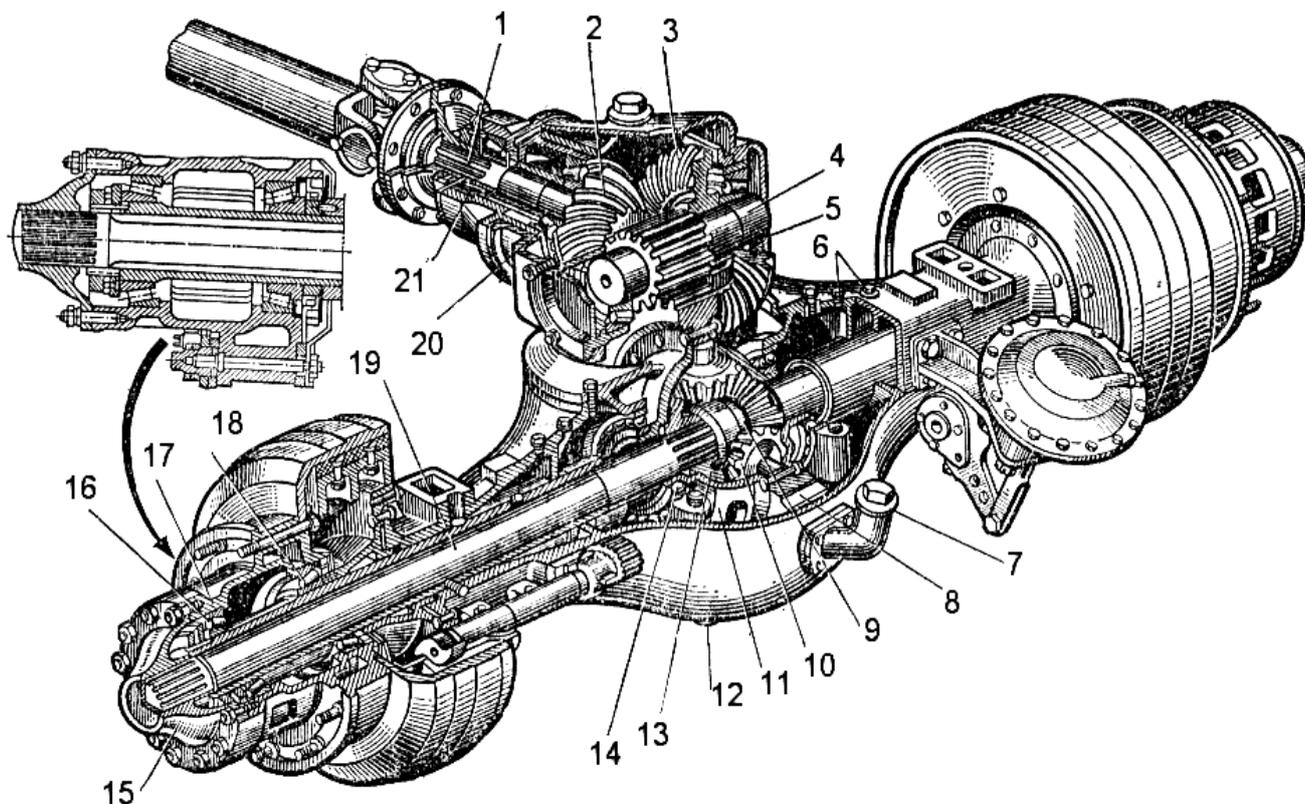
Главная передача, дифференциал и полуоси располагаются в общем картере.



Р и с. 5.7. Карданные передачи автомобилей:

а - двухосного с приводом на заднюю ось; б - двухосного с приводом на обе оси; в - трехосного с приводом на все оси
1 - карданный шарнир; 2, 4 - карданные валы; 3 - промежуточная опора

Главная передача бывает одинарной (пара конических шестерен) и двойной, когда добавляется еще пара цилиндрических шестерен для увеличения передаточного числа механизма. Такую схему имеет мост, приведенный на рис. 5.8, где цилиндрическая шестерня имеет позицию 4. Дифференциал предназначен для возможности вращения колес с разными скоростями.



Р и с. 5.8. Задний ведущий мост и главная передача автомобиля КраЗ-257:

- 1 - вал ведущей конической шестерни; 2 - ведущая коническая шестерня;
- 3 - ведомая коническая шестерня; 4 - вал ведомой конической шестерни;
- 5 - ведущая цилиндрическая шестерня; 6 - сапуны; 7 - заливная горловина;
- 8 - ведомая цилиндрическая шестерня; 9 - крестовина; 10 - сателлит; 11 - чашка коробки дифференциала; 12 - пробка; 13 - полуосевая шестерня; 14 - шариковый подшипник; 15 - фланец; 16, 18 - конические роликовые подшипники;
- 17 - ступица колеса; 19 - полуось; 20, 21 - роликовые конические подшипники

Смазка механизмов моста обычно производится методом разбрызгивания масла, залитого в картер, ведомой конической шестерней.

Ведущие мосты требуют тщательной регулировки качества зубчатых зацеплений, при плохой регулировке возникает шум. Уплотнения должны обеспечить герметичность картера. От качества смазки зависит работоспособность роликовых подшипников ступицы.

Не менее сложной и ответственной является совокупность механизмов, составляющих систему рулевого управления автомобилем. Почти все элементы системы представляют собой узлы трения. Это опоры рулевого колеса и вала, пары

рулевого механизма поворота колес, гидравлический усилитель. Рулевой механизм обычно устроен по типу винт-гайка или винт-рейка. Для легкости поворота здесь используют шариковые винтовые пары.

Износы и разрегулирования приводят к люфтам или свободному ходу рулевого колеса.

Тормозной механизм содержит пару трения "тормозной барабан - колодка" и разжимное устройство. Колодки при работе нормально разжаты.

К фрикционным накладкам тормозов предъявляются высокие требования по характеристикам трения, по температурной стойкости и сопротивлению изнашиванию. Здесь недопустимы схватывания и задиры.

Обычно в конструкции предусмотрено два механизма торможения - с приводом от педали и ручным. В тяжелых автомобилях предусмотрена пневмосистема, обеспечивающая легкость управления тормозом и реализацию необходимых усилий на тормозной паре.

5.1.3. Шины и проблемы движения колесных машин

Пневматические шины автомобиля с точки зрения трибологии являются чрезвычайно содержательным многогранным объектом.

При работе шины в режиме качения и скольжения реализуются закономерности трения эластомеров. Как технический объект шины выполняют 6 основных функций:

функцию качения с малым сопротивлением;

функцию снижения контактных нагрузок в зоне контакта с дорожным полотном;

функцию демпфера, защиты транспортных средств от толчков, снижения уровня шума;

шина передает крутящийся момент, как источник движения экипажа;

шина обеспечивает торможение;

комплект шин создает поперечную устойчивость и устойчивость в направлении движения.

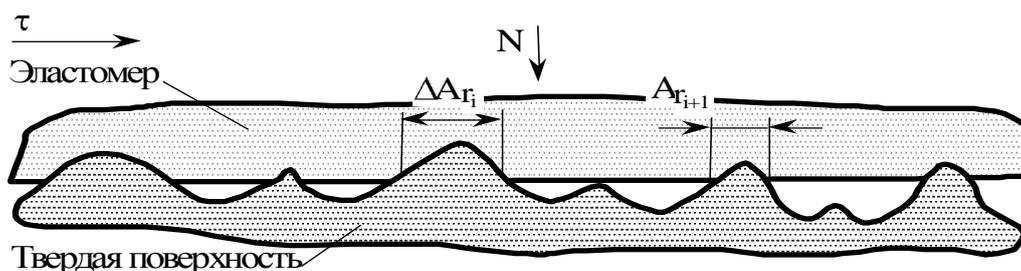
Чтобы эффективно выполнить эти функции, шина должна представлять собой сложную конструкцию.

Схема контакта между твердой шероховатой поверхностью и эластичной шиной изображена на рис. 5.9.

Если на схеме (см. рис. 5.9) к эластомеру последовательно приложить нормальную и касательную нагрузки, то на участках касания (ΔA_{fi}) возникнут упругие нормальные реакции:

$$W = \sum_{i=1}^M \Delta A_i \cdot P_i, \quad (5.1.)$$

где P_{fi} - давление на площадке фактического контакта.



Р и с. 5.9. Схема образования силы трения в контакте эластомера с твердой шероховатой поверхностью

Приложение тангенциальной силы τ вызовет сопротивление адгезионных сил

$$T = \sum_{i=1}^M T_{r_i}, \quad (5.2.)$$

где T_{r_i} - адгезионные силы на каждом пятне контакта, $T_{r_i} = \tau \Delta A_{r_i}$ (τ - удельная адгезионная сила трения).

После начала движения кроме адгезионного сопротивления движению начинается еще и деформационное сопротивление, поскольку восстановление деформации эластомера запаздывает (вязкоупругость). Эту составляющую еще называют гистерезисной составляющей трения.

Таким образом, суммарная сила трения эластомера

$$T = T_{\text{адгез}} + T_{\text{гистер}}. \quad (5.3.)$$

С учетом отмеченного формируют рисунок протектора. Главное назначение рисунка протектора обеспечить отвод влаги из пятна касания шины с дорогой, хотя это неизбежно уменьшает площадь контакта и снижает эффективное значение коэффициента трения ($c \sim 0,5$ до $0,4$).

Наиболее распространены 3 вида рисунка протектора, показанные на рис. 5.10.

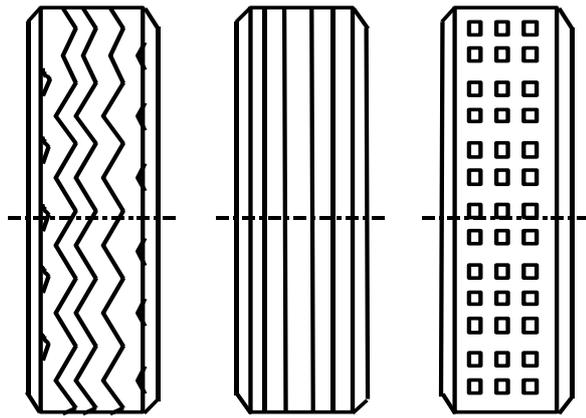
Характерные размеры каналов и желобков приведены на рис. 5.11

Зона сцепления шины с поверхностью, форма пятна контакта, распределение давления по пятну контакта показаны на рис. 5.12.

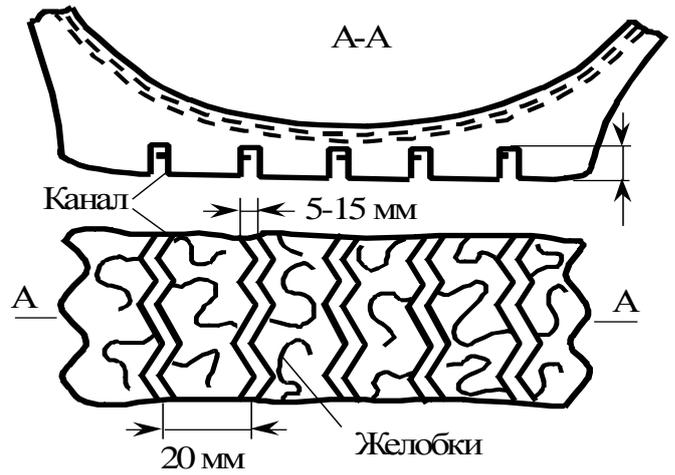
Как видно из рисунка, при торможении или разгоне в передней части пятна контакта проскальзывание отсутствует, но возникает скольжение в его задней части. Это обстоятельство определяет неустойчивость сил торможения или разгона. Они, в целом, меняются в зависимости от режима свободного качения до режима скольжения заблокированного колеса или работы колеса в режиме тягового скольжения.

Общая характеристика тормозной силы и относительной силы тяги при постоянной скорости движения экипажа приведены на рис. 5.13.

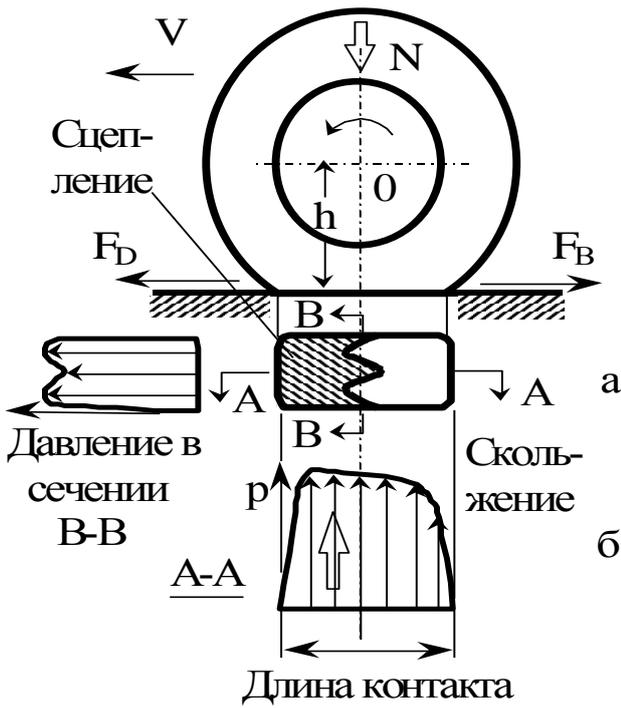
Обе кривые на рис. 5.13 имеют экстремальные значения, которые являются оптимальным режимом работы шины.



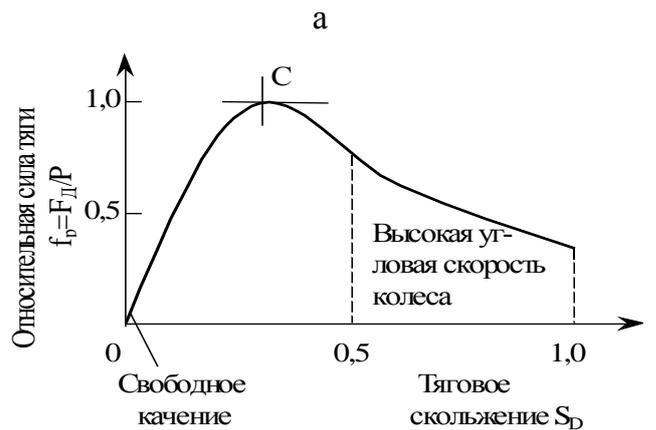
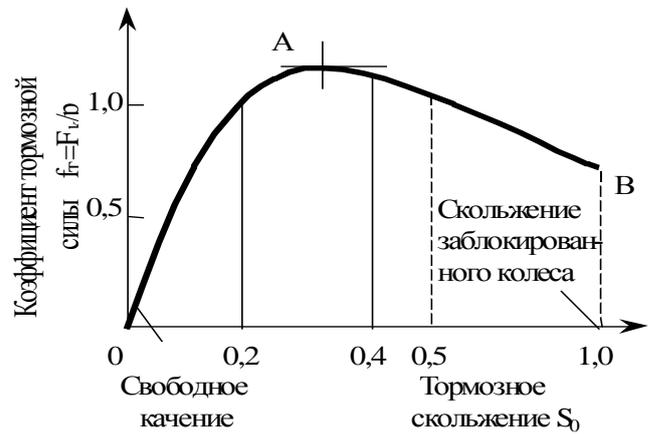
Р и с. 5.10. Три основных типа рисунка протектора:
 а - зигзагообразный; б - ребристый;
 в - блочный



Р и с. 5.11. Каналы и желобки в типичном зигзагообразном рисунке протектора



Р и с. 5.12. Пятно касания и распределения давления при качении шины:
 а - пятно касания; б - распределение давления в вертикальной плоскости (сечение А-А)



Р и с. 5.13. Характеристики тормозной силы и относительной силы тяги при качении:
 а - торможение; б - разгон

Аналитически силу торможения F_T и силу разгона F_P по Д. Муру (Англия) определяют из следующих соотношений

$$F_T = \frac{M_T}{h} + N \frac{a}{h} \left[1 \pm 4 \frac{\ddot{x}}{q} \left(\frac{h_\infty}{L} \right) \right];$$

$$F_P = \frac{M_P}{h} + N \frac{a}{h} \left[1 \pm 4 \frac{\ddot{x}}{q} \left(\frac{h_\infty}{L} \right) \right], \quad (5.4.)$$

где M_T и M_P - моменты торможения или разгона; h_{cg} - высота центра тяжести автомобиля над уровнем дорожного полотна; L - колесная база; N - нагрузка в расчете на одно колесо, приложенная посередине между передними и задними колесами; a - эксцентриситет опорной реакции при качении; h - расстояние от оси шины до поверхности.

Однако уравнение (5.4.) дает "идеальные" расчетные результаты, которые подлежат коррекции в случае наличия влаги на поверхности дороги.

Качественную картину работы колеса в осложненных условиях иллюстрирует рис. 5.14.

Перед набегающей шиной образуется заполненный водой клин (см. рис. 5.14,а), создающий гидродинамическую силу P_n . В зоне АВ протектор выдавливает влагу, а затем все более облегает рельеф дорожного полотна и достигает сцепления в зоне СД.

Реализация сцепления зависит от скорости, рост которой может полностью исключить сцепление и вызвать режим гидропланирования (глиссирования). Если при этом скорость вращения колеса будет возрастать, то наступает еще один качественный режим, называемый динамическим гидропланированием.

Изнашивание шин как представителя эластомеров имеет три основных механизма:

абразивный износ, при котором острые грани неровностей царапают и вырывают частицы материала протектора;

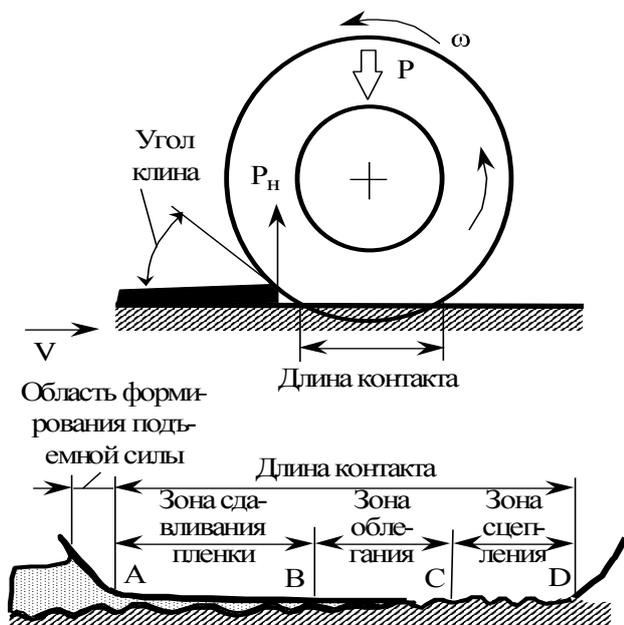
усталостный износ, при котором наблюдается охрупчивание и разрушение материала протектора из-за усталости;

образование роликотипных частиц (окатышей) и их отрыв от поверхностей протектора.

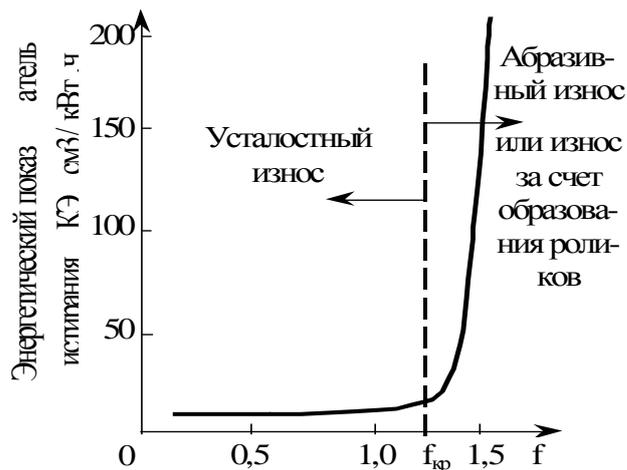
Соотношение указанных видов износа приведено на рис. 5.15.

Считается, что истирание возникает вследствие проскальзывания в задней части пятна контакта, но, как показывает опыт, шины поворотного действия изнашиваются больше, чем на задних мостах, где реализуются режимы разгона и торможения. Таким образом "поперечные" проскальзывания имеют более вредное действие.

В целях обеспечения безопасности движения и ресурсосбережения развиваются средства повышения качества бутадиен-стирольного каучука, методы повышения прочности и долговечности металлической и тканевой арматуры и, в особенности, методы создания оптимального рельефа протекторов.



Р и с. 5.14. Три зоны на длине контакта при качении по мокрой дороге:
 а - общая конфигурация;
 б - зоны в области контакта



Р и с. 5.15. Износ протектора и коэффициент трения для различных резин

Вторым направлением является совершенствование системы колес, тормозных устройств, повышение износостойкости тормозных дисков, применение противозаносных устройств и др.

1.24. 5.2. Конструкционные материалы узлов трения

Выбор конструкционных материалов деталей узлов трения представляют собой базовую проблему при стремлении к высоким эксплуатационным характеристикам и рассматриваются трибоматериаловедением.

Основными задачами трибоматериаловедения являются отбор известных и создание новых материалов, обладающих оптимальными для данного узла трения характеристиками, обеспечивающими необходимый ресурс. При этом, помимо достижения необходимых эксплуатационных свойств, требуется учитывать экономические соображения исходя из рыночных условий. Поэтому трибоматериаловедение обычно решает компромиссные задачи, когда требуется достижение целесообразного соотношения между уровнем эксплуатационных характеристик и себестоимостью.

В связи с этим важно, чтобы материалы узлов трения создавались из доступных недефицитных компонентов с использованием технологий, не требующих нестандартного оборудования, высокого вакуума, криогенных температур и других дорогостоящих мероприятий.

Все материалы узлов трения можно разделить на две группы: антифрикционные и фрикционные. Первые применяются при создании подвижных соединений

с низким трением и высокой износостойкостью: подшипников качения и скольжения, шарнирных соединений, направляющих для ползунов, эксцентриковых и кулачковых механизмов и т.д. Вторые применяются в тормозах, фрикционных передачах и муфтах. Они должны обладать не только высоким и стабильным коэффициентом трения, но и высокой износостойкостью.

При выборе материалов узлов трения должна учитываться их совместимость, в особенности использование схватывания и последующего задира, что связано с химическим сродством, близостью строения и значений параметров кристаллических решеток. В более общей форме под совместимостью понимают способность материалов обеспечивать оптимальные параметры узла трения при длительной эксплуатации, быстро приспосабливаться к резким изменениям нагрузки, скорости и температуры при неблагоприятных условиях смазки.

Процесс приработки должен заканчиваться образованием на поверхностях трения тонких слоев вторичных структур, предохраняющих материал от схватывания и задиров, а также равновесной шероховатости, необходимой для обеспечения стабильного значения коэффициента трения.

В этой области наукой еще не вполне раскрыты механизмы самоорганизации в зоне контакта и пути воздействия на способность пар трения к самоорганизации, когда система сама формирует оптимальную микрогеометрию поверхностей, защитные пленки, перестраивает структуру поверхностных слоев металла, меняет твердость в целях сохранения нормального функционирования. В настоящее время применяют прямые и косвенные методы оценки совместимости материалов узлов трения. В обоих случаях сначала проверяется, не обладают ли материалы химическим сродством - совместимостью кристаллических решеток. При прямых методах проводятся испытания материала на машинах трения с целью определения критических значений параметров режима нагружения, приводящих к задиру, т.е. нахождения границ применимости исследуемой пары. Косвенные методы основаны на определении параметров микрогеометрии, микроструктуры поверхностных слоев, физико-механических свойств, их изменения в процессе трения в целях прогнозирования совместимости. Окончательный же ответ на вопрос о совместимости материалов могут дать лишь ресурсные полные испытания.

5.2.1. Металлические антифрикционные материалы

Антифрикционные материалы используются преимущественно в ответственных узлах, подшипниках, шарнирах, направляющих скольжения и качения, распределительных валах, клапанных и кулачковых механизмах и т.д.

Цапфы подшипников скольжения обычно изготавливают из сталей и чугунов.

Из числа легированных наиболее часто применяют легированные стали: марганцовистые (35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2 и др.), хромомолибденовые (30ХМ, 3ХМА, 35ХМ, 38ХМ), хромоникелевые (40ХН, 45ХН, 30ХН3А), хромоникелевые с бромом (30ХНР, 40ХНР) и хромомарганцовистоникелевые с бромом - 40 ХГНР. Детали подвергают либо объемной закалке с отпуском, либо поверхностной закалке токами высокой частоты (ТВЧ).

Для подшипников скольжения (вкладышей, втулок шарниров и др.) используются различные антифрикционные сплавы. К ним относятся сплавы на медной, цинковой, алюминиевой и оловянно-свинцовой основах. Последние получили название баббитов. Изредка применяют антифрикционные чугуны с графитными включениями.

Баббиты и чугуны применялись на начальном этапе развития техники и имеют лишь историческое значение. По мере роста мощности двигателей, ужесточения режима эксплуатации, снижения металлоемкости произошел переход к более твердым подшипниковым материалам на медной, цинковой и алюминиевой основах, хорошо совместимых со сталями.

Медные антифрикционные материалы разделяются на бронзы и латуни. Бронзы - это сплавы меди с оловом и другими элементами. У них цинк и никель не являются главными легирующими компонентами. Наиболее распространены оловянистые бронзы. Неосновными легирующими элементами являются свинец, никель, фосфор, цинк, железо и др.

Меньшее распространение, чем бронзы, получили латуни. Наиболее часто в качестве антифрикционных материалов используют кремнистые и марганцовистые латуни, а также алюминиево-железистые.

В качестве подшипниковых материалов успешно применяются цинковые сплавы с легирующими элементами в виде меди, алюминия, магния. Низкая температура плавления (400°C) и повышенная размягчаемость обеспечивают хорошую прирабатываемость. Из них делают биметаллические вкладыши подшипников скольжения. В стальной стакан заливается цинковый сплав, который ровным слоем покрывает внутреннюю поверхность. Другим способом изготовления вкладышей является штамповка их из биметаллической полосы, состоящей из стали и цинкового сплава и получаемой методом горячей прокатки. Такие вкладыши используются в некоторых видах тракторных двигателей.

В современном автомобиле- и тракторостроении широкое распространение получили антифрикционные сплавы на основе алюминия. Алюминиевые сплавы обладают сравнительно высокой прочностью, коррозионной стойкостью, дешевы и недефицитны, имеют низкую плотность и высокую теплопроводность. В качестве легирующих элементов используются олово, медь, никель, кадмий, кремний, железо, марганец, титан и другие элементы. В автомобилестроении наиболее распространены алюминиево-оловянистые сплавы с содержанием олова до 22,5 %. При содержании олова более 9 % возможно применение вкладыша без покрытия мягким металлом. В других случаях на рабочую поверхность наносится защитный слой олова. Наибольшее распространение получил сплав А020-1 (1 % -Ca, 20 % - Sn, 0,02 - 0,1 Ti, остальное - Al). Биметаллические вкладыши изготавливаются путем совместной прокатки с последующей штамповкой. При нарушении режима гидродинамической смазки и возникновении металлического контакта как на поверхности вкладыша, так и цапфы образуется защитная пленка мягкой фазы - олова, внутри которой и локализуются сдвиговые деформации.

5.2.2. Антифрикционные материалы, получаемые из порошков и пластмасс

Одним из направлений получения антифрикционных материалов является создание порошковых антифрикционных композитов. Изделия (втулки, вкладыши подшипников) получают методом порошковой металлургии. Сначала составляется смесь из порошков необходимых веществ, которая после тщательного перемешивания прессуется в виде изделия и спекается. Если это необходимо, то осуществляется механическая отделочная обработка изделия и насыщение пор смазкой. Наиболее распространены материалы на основе меди и железа.

Материалы на основе меди получили широкое применение из-за хороших антифрикционных свойств и высокой электропроводности, например, в скользящих электроконтактах в щётко-коллекторных узлах электродвигателей и генераторов и т.д. Типичным представителем этой группы являются медно-графитовые компоненты с содержанием графита до 75 %. Для улучшения свойств электрощеточных материалов в них добавляют олово, цинк, свинец. Графит обеспечивает смазывание контакта и электропроводность.

В качестве подшипникового материала также используются пористые оловянные бронзы. Они применяются в подшипниках, работающих в легком режиме при небольших скоростях скольжения (менее 1,5 м/с) и номинальных давлениях (0,5 - 1 МПа). Благодаря смазке, содержащейся в порах, они могут работать без наполнения маслом до 5000 ч при температуре от - 60 °С до 120 °С с коэффициентом трения 0,01 - 0,04. Эти подшипники используются в маломощных электромоторах и генераторах, пусковых установках ДВС. В табл. 5.2 приведены сведения о некоторых оловянистых бронзах.

Таблица 5.2.

Свойства оловянистых бронз

Марка	Массовая доля Sn, %	Плотность, кг/м ³	Пористость, %	Предел прочности σ_B , МПа	Твердость НВ, МПа
Бр010	10	6 - 7	20 - 30	20 - 35	60 - 75
Ст100 США)	9,5 - 10,5	6,4 - 7,2	---	40 - 50	100 - 120
SM500 (ФРГ)	10	5,6 - 11	---	---	---

В подшипниках мотоциклов, тракторов, насосов и др. используются бронзо-графитные материалы. Они выдерживают большие нагрузки и скорости скольжения, чем бронзы.

В двигателях грузовых автомобилей, судовых и железнодорожных дизелях в России и ведущих странах зарубежья используются свинцовистые бронзы. Обычно стальная лента сначала покрывается электролитическим слоем меди, на которую наносится порошок свинцовистой бронзы. Порошок припекается к ленте в конвейерной печи. После припекания производится обжатие ленты методом прокатки. Из ленты штампуют заготовки вкладышей, которые затем механически об-

рабатываются. На заключительной стадии электролитическим способом наносится слой мягкого металла (свинца, олова, меди, индия).

Аналогичным способом получают и используют спеченные латуни, сложнолегированные бронзы. Помимо графита в качестве самосмазывающей добавки используются дихалькогениды металлов: дисульфиды, диселениды, дителлуриды и др.

В последнее время в России и за рубежом используются металлофторопластовые материалы. Они обладают широким диапазоном эксплуатационных свойств, способны работать без смазки в агрессивных средах, в вакууме, при температуре от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Подшипниковые вкладыши состоят из стальной основы, тонкого припеченного слоя высокооловянистой бронзы (до 0,3 мм), поры которого заполнены смесью фторопласта с дисульфидом молибдена.

Помимо сплавов на медной основе все больше распространяются антифрикционные алюминиевые сплавы. Технология изготовления вкладышей такая же, как при применении медных сплавов. Поры пропитываются маслом. Используются твердосмазочные добавки. В США в подшипниках автомобильных двигателей применяются вкладыши из стальной ленты с припеченным порошком свинцово-оловянного сплава. Технология та же, что при изготовлении вкладышей из свинцовой бронзы.

Наиболее распространены в общем машиностроении (сельхозмашины, дорожно-строительные механизмы и т.д.) материалы на основе железа. В шихту, также, как и у медных сплавов, вводится графит, сернистый цинк, дисульфид молибдена, нитрид бора. Поры спрессованного материала заполняются маслом. Чаще всего применяются железографитовые втулки. С ростом содержания графита улучшаются антифрикционные свойства, однако падает прочность. Содержание графита обычно не превышает 10 % от общей массы. В качестве легирующих элементов к железу добавляют медь, серу, фосфор. Медь повышает прочность и улучшает спекаемость. Её содержание колеблется от 0,5 до 20 %.

Применение железографитовых подшипников позволяет экономить большое количество сплавов цветных металлов, бронзы, баббита. В ряде случаев железографитовые подшипники скольжения могут успешно заменить шариковые и роликовые подшипники качения. Наличие графита и запас жидкой смазки в порах придают металлокерамическим подшипникам свойства самосмазывающихся, что уменьшает опасность выхода из строя узлов трения из-за недостаточной смазки.

В настоящее время решена задача изготовления металлокерамических поршневых колец для двигателей внутреннего сгорания. Такие поршневые кольца имеют более высокую износостойкость по сравнению с обычными чугунами. Они работают до выхода из строя на 30-45 тыс. км пробега автомашин больше, чем чугунные, и на 30 % меньше изнашивают цилиндры двигателя.

Расширяется также применение пористых спеченных подшипников, пропитанных фторопластом. Такие подшипники весьма перспективны для несмазываемых опор скольжения благодаря высоким антифрикционным свойствам фторопласта. Коэффициент трения подшипников, пропитанных фторопластом, без

смазки составляет примерно 0,05. Они надежно работают при температурах до 280 °С в кислых и щелочных средах.

Разработаны антифрикционные спеченные материалы для подшипников газовых и паровых турбин, работающих при высоких температурах. Для получения этих деталей используют порошки хромоникелевых сталей типа Х18Н15, ХЗН18 с добавками в шихту дисульфида молибдена. Спеченные материалы имеют плотность, превышающую 90 %. Более низкая стоимость пористых спеченных подшипниковых материалов по сравнению с бронзой и баббитом стимулирует дальнейшее развитие этого направления разработки триботехнических материалов и технологий.

5.2.3. Фрикционные материалы

В отличие от антифрикционных фрикционные материалы должны обладать высоким и стабильным коэффициентом трения, достаточной износостойкостью, прочностью, устойчивостью к температурным скачкам, воздействию абразива и агрессивных сред. В частности, материалы тормозов и фрикционных муфт должны обеспечивать плавное срабатывание системы без автофрикционных колебаний, проявляющихся в форме скрипа при торможении, или пробуксовки и обеспечивать высокий срок службы. При торможении вся кинетическая энергия транспортного средства в тормозах рассеивается в тепло. Поэтому в момент торможения температура трущихся поверхностей, например в тормозе самолетов, достигает 1200°С, а в объеме тормозной накладки до 600°С. В тормозах автомобилей эти температуры соответственно могут достигать 400°С и 200°С.

Для изготовления ряда элементов наиболее нагруженных фрикционных устройств - тормозов и муфт сцепления - применяются материалы, получаемые методом порошковой металлургии. Наибольшее распространение получили материалы на основе железа и меди. Состав материалов на основе железа приведен в табл. 5.3.

Таблица 5.3.

Состав фрикционных порошковых материалов на железной основе

Марка материала	Массовая доля, %						Другие добавки, %
	Fe	Cu	Ni	Графит	SiO ₂	Асбест	
ФМК - 8	45	-	25	7	-	-	10Cr; 6W; 7Cu ₂ S
ФМК - 11	64	15	-	9	3	3	6BaSO ₄
МКВ - 50А	64	10	-	8	-	3	5FeSO ₄ ; 5SiC; 5B ₄ C
СМК - 80	48	23	-	-	-	-	6,5Mn; 6,5BN; 10B ₄ C; 3,5SiC; 2,5MoS ₂

Первые три материала разработаны для тяжело нагруженных тормозов и муфт самолетов и военной техники. Материал СМК-80 применяется в тормозах и муфт-

тах сцепления большегрузных автомобилей - карьерных самосвалов грузоподъемностью более 65 т.

Спеченные материалы на основе меди также широко используются в тяжелых транспортных средствах. В табл. 5.4 приведены данные о составе фрикционных материалов на медной основе.

Таблица 5.4.

Состав фрикционных порошковых материалов на медной основе

Массовая доля, %							Другие добавки, %
Cu	Sn	Pb	Fe	Графит	Асбест	SiO ₂	
68÷76	8÷10	7÷9	3÷5	6÷8	-	-	-
60÷75	6÷10	20	5	1÷8	-	-	Ti, V, Si, 6MoS ₂ , 2÷10As
18	2	3	3	3	30	-	40 стеклянного волокна, 10 сульфида Al
68÷86	5÷10	5÷15	2	4÷8	3	3	до 2Ni
75	8	5	4	1÷20	-	-	0,75Si, 6Zn

Наибольшее распространение получил материал МК5 (первая строка таблицы). В автомобильном и тракторостроении из этих материалов изготавливают тормозные диски, колодки и накладки для муфт сцепления.

Порошковая технология позволяет получать фрикционные материалы с заданными свойствами. Для автомобилей малой и средней грузоподъемности и для сельскохозяйственных и промышленных тракторов малой и средней мощности обычно используются фрикционные материалы на полимерной основе. Они применяются также в сельскохозяйственном и дорожно-строительном машиностроении, в буровой технике и т.д.

Как правило, в состав материалов входит 3 компонента:

теплостойкий армирующий материал с прочными волокнами, например асбест (15÷16%);

теплостойкие с высоким и стабильным коэффициентом трения порошкообразные наполнители неорганического происхождения (20÷60%);

полимерное связующее: натуральные и синтетические каучуки, синтетические смолы (15÷30%) с вулканизационными агентами или отвердителями, ускорителями и активаторами вулканизации или отверждения.

Наиболее распространенным армирующим элементом является уникальный природный минерал, добываемый открытым методом - асбест. Элементарные волокна асбеста имеют вид трубок с наружным диаметром около 32 нм и внутренним - 2,6 нм, т.е. в поперечном направлении волокно имеет размеры, характерные для коллоидно-дисперсных материалов. Элементарные волокна упакованы в пряди диаметром от нескольких десятков до сотен микрометров. В прядях волокна удерживаются силами межмолекулярного притяжения. Средняя длина волокна составляет 1÷3 мм. По своей химической природе асбест является водным силикатом магния. Волокна асбеста обладают высокой прочностью на растяжение (до

3 гПа), много превышающей прочность стали. Полости волокон частично или полностью заполнены водой, которая образует на внутренней поверхности практически мономолекулярный слой, поэтому она проявляет свойства иные, чем обычная влага, удаляясь лишь при температуре выше 425°C. Вид кристаллической решетки этого материала достоверно не установлен. Асбест обладает высоким коэффициентом трения (до 0,8), который слабо меняется в зависимости от температуры. То же можно сказать о прочности волокон, которая при нагревании до 400°C снижается всего на 20%. Лишь при 800°C наблюдается разрушение волокнистой структуры. Таким образом, асбест как будто специально создан как основа для фрикционного материала. Однако у асбеста имеется и существенный недостаток. Он считается экологически опасным материалом. Тончайшие моноволокна, попадая в воздух в виде пыли, образуют устойчивую взвесь, которая весьма медленно оседает. Попадая в легкие людей и животных, волокна поражают органы дыхания, вызывая заболевание "асбестоз". Пораженные участки легких могут стать центрами образования раковых клеток. Во многих странах уже запрещено использование асбеста в строительстве, электротехнике и других отраслях. Такие же тенденции наблюдаются и в производстве тормозных материалов, но найти эффективную замену асбесту пока не удалось. Имеются попытки заменить асбест волокнами из стекла, базальта, шлака, бора, углерода, но эти материалы еще не дали такого же эффекта, как асбест. В частности, нет такого материала, который так же, как асбест, очищал бы поверхность металлического контртела и при этом поглощал и связывал продукты изнашивания, не говоря о других качествах. Поэтому асбест пока сохраняет заслуженное лидерство среди компонентов фрикционных материалов.

Наполнителями асбестовых материалов служат железный сурик, баритовый концентрат, окислы хрома и других металлов. Добавляются также порошкообразный кокс, графит, технический углерод. Для повышения теплопроводности вводятся порошки и стружка из меди, латуни, цинка, алюминия, железа и т.д.

Связующими являются натуральные и искусственные каучуки и смолы, а также их комбинации. Используются бутадиеновые, бутадиен-тиррильные, бутадиенметилвинилпиримидиновые, стирольные и другие синтетические каучуки. В качестве смол применяются фенол-формальдегидные, анилинфенолформальдегидные, кремнеорганические, эпоксидные компаунды и др. Одновременно вводятся вулканизаторы и отвердители.

Изделия на каучуковой основе обладают достаточно высоким коэффициентом трения и износостойкостью. Однако при повышении температуры выше 200 ÷ 250 °C коэффициент трения и износостойкость заметно снижаются.

Изделия на смоляной основе имеют большую теплостойкость, но обладают нестабильным коэффициентом трения, хрупкостью. Поэтому наилучший результат достигается при совместном использовании смол и каучуков. Неудачное сочетание связующих из-за нестабильности коэффициента трения приводит к возникновению автофрикционных колебаний (скрип и визг тормозов).

Фрикционные муфты и тормоза являются весьма ответственными узлами, поскольку определяют безопасность эксплуатации транспортных средств, поэтому

при их разработке производится весьма точный и детальный расчет. Изготавливаются опытные образцы, которые проходят сначала лабораторные, затем стендовые и натурные испытания. Особо тщательно отрабатываются новые тормозные материалы, подвергающиеся длительным испытаниям по специальным методикам.

По способу изготовления фрикционные материалы на полимерной основе делятся на 4 группы: формованные (прессованные) материалы (колодки, накладки, секторы, пластины, вкладыши); вальцованные (ленты и накладки); тканые (ленты, накладки); картонно-латексные (накладки). Номенклатура и характеристики фрикционных и антифрикционных материалов очень обширна и содержится в справочной литературе.

5.2.4. Полимерные материалы

Обзор полимерных материалов (пластмасс) представлен по данным Ю.К. Машкова. Эти материалы широко применяются в узлах трения современных машин и механизмов. Применение пластмасс позволяет увеличить надежность и ресурс машин, улучшить их эксплуатационные, технико-экономические характеристики и технологичность, отказаться от дефицитных сплавов цветных металлов и снизить стоимость машин.

Пластмассы подразделяются на термопластичные и терморезистивные. К термопластичным относятся пластмассы с линейной или разветвленной структурой полимеров, свойства которых обратимо изменяются при многократном нагревании и охлаждении. К терморезистивным пластмассам относятся полимеры, в которых при термическом воздействии возникают реакции химического связывания цепных молекул друг с другом с образованием сетчатого строения. Такие пластмассы не могут переходить в пластичное состояние при повышении температуры без нарушения пространственных связей в структуре полимера.

Полимеры (термопластичные и терморезистивные) могут использоваться в качестве антифрикционных материалов как в чистом виде, так и в виде композиционных материалов с различными наполнителями. Из полимерных материалов изготавливают зубчатые колеса, шкивы, трущиеся элементы подшипников скольжения, кулачковых механизмов, направляющих, уплотнений, сепараторы шарикоподшипников, втулки шарниров и т.д.

Антифрикционные материалы на основе термопластов отличает высокая технологичность, низкая себестоимость, хорошие демпфирующие свойства. Детали из термопластов изготавливают высокопроизводительными методами - литьем под давлением и экструзией; крупногабаритные детали - центробежным литьем, ротационным формованием, анионной полимеризацией мономера непосредственно в форме, нанесением антифрикционных покрытий из расплавов, порошков, дисперсий.

Терморезистивные полимеры обрабатываются преимущественно методами компрессионного и литьевого прессования, они более прочны и термостойки. По-

рошкообразные термореактивные композиции наносят на трущиеся поверхности деталей в виде тонких покрытий.

В качестве антифрикционных термопластичных материалов наиболее широко используют *полиамиды* (капрон, П68, П6, П12 и др.), обладающие низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью и работающие при температуре от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. К недостаткам полиамидов следует отнести их относительно высокое водо- и маслопоглощение. Деталям из полиамидов свойственна хорошая сопротивляемость воздействию циклических нагрузок, возможность работы без смазки в паре с закаленной сталью. Коэффициент трения полиамидов по стали без смазки $0,1\div 0,2$, со смазкой маслом - в пределах $0,05\div 0,10$.

Для повышения механических свойств полиамиды армируют волокнистыми и другими материалами, а для улучшения антифрикционных свойств в них вводят различные твердосмазочные графитоподобные компоненты.

В качестве последних применяют графит, дисульфид молибдена, тальк, термоантрацит, а в качестве армирующего наполнителя - мелконарубленное стекловолокно или измельченное углеродное волокно.

Температурный коэффициент линейного расширения и водопоглощение наполненных полиамидов в $1,5\div 4,0$ раза меньше, коэффициент трения без смазки в $1,2\div 2,0$ раза больше, а интенсивность изнашивания в $2\div 5$ раз ниже, чем у ненаполненных полиамидов. Полиамиды применяют также в качестве тонкослойных покрытий металлических деталей.

В приборо- и машиностроении для изготовления деталей узлов трения широко применяют *фторопласты* и *композиционные материалы* на основе фторопластов. Фторопласты отличаются высокой химической стойкостью, высокой температуростойкостью (до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$), а также сохраняют работоспособность, не охрупчиваясь при охлаждении до $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На фторопласты практически не действуют кислоты, окислители, щелочи, растворители. При температуре выше $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ фторопласты реагируют с некоторыми металлами и окислами. Коэффициент трения фторопластов, особенно фторопласта-4 ($0,03\div 0,05$) находится на уровне значений коэффициента трения металлических пар в гидродинамическом режиме скольжения.

Применение фторопластов в чистом виде без наполнителей весьма ограничено вследствие низкой прочности и износостойкости. В машиностроении используются в основном композиционные материалы. Введение различных наполнителей (кокс, графит, дисульфид молибдена, металлические порошки, стекловолокно, углеродное волокно) в количестве $15\div 45\%$ по массе позволяет значительно повысить прочность и износостойкость (в $10\div 100$ раз и более). Использование фторопластов в виде лаков, паст, суспензий для изготовления антифрикционных наполнителей для различных композиционных материалов на основе термопластических и термореактивных полимеров значительно снижает коэффициент трения и интенсивность изнашивания многих узлов трения.

Ароматические полиамиды применяются для изготовления деталей узлов трения как в чистом виде, так и в виде композиционных материалов, наполненных фторопластом, графитом, дисульфидом молибдена и другими твердыми смазоч-

ными материалами. Детали из ароматических полиамидов отличаются высокой прочностью и теплостойкостью, их изготавливают методами компрессионного и литьевого прессования. Выпускаемый промышленностью ароматический полиамид фенилон стоек против многих химических веществ, масел, бензина. Детали из фенилона можно эксплуатировать при температурах от -50 до $+200$ °С. Наполнение фенилона твердыми смазочными материалами значительно улучшает его триботехнические свойства.

Фенилон используют для изготовления подшипников скольжения, подпятников, уплотнений, зубчатых колес, сепараторов шарикоподшипников, деталей клапанов, кулачков и т.д.

Поликарбонат применяют в машино- и приборостроении, в радио- и электротехнической промышленности, для изготовления деталей точных станков, приборов, вычислительных машин и т.д. Поликарбонат стоек к атмосферным воздействиям, воды, водных растворов минеральных кислот и солей, окислителей, масел, в то же время он растворяется в ряде углеводородов (ацетон, толуол и др.), набухает в бензине.

Поликарбонат пригоден для работы в условиях низких и сверхнизких температур, в среде газообразного и жидкого азота, водорода и гелия при температуре до -253 °С. Он обладает высокой ударной прочностью и стабильностью размеров деталей, малой ползучестью, однако плохо сопротивляется циклическим воздействиям нагрузки и имеет низкую усталостную прочность.

Промышленность выпускает поликарбонат - дифлон, наполненный 25% по массе стекловолокном (дифлон СТН) и наполненный фторопластом (дифлон ДАК 8).

Освоено производство антифрикционного поликарбоната, представляющего собой дифлон, модифицированный фторопластом - 4. У этого материала сохраняются высокие физико-механические и диэлектрические свойства поликарбоната и одновременно в $1,5 \div 2$ раза улучшаются антифрикционные свойства. Поликарбонат перерабатывают литьем под давлением и экструзией и применяют в несмазываемых узлах трения, например в криогенной и микрокриогенной технике.

Расширяется применение *полиолефинов* (полиэтилен высокого давления, полипропилен) в качестве антифрикционных материалов как в чистом виде, так и в композициях с наполнителями. Полиолефины стойки к действию большинства кислот, щелочей, не растворяются в органических растворителях при 20 °С. Однако сильные окислители (азотная кислота и др.), хлор, фтор разрушают их, и при повышенных температурах они растворяются во многих органических растворителях.

На основе полиолефинов создают композиционные материалы, вводя различные наполнители (сажу, каучук, стекловолокно, древесные опилки и т.д.), что позволяет получать материалы, обладающие высокой износостойкостью и коэффициентом трения $0,1 \div 0,15$. К недостаткам свойств полиолефинов следует отнести низкую теплоемкость, так как детали узлов трения могут длительно эксплуатироваться при температуре не выше 60 °С (кратковременно до 80 °С). Это снижает возможность применения полиолефинов в машиностроении.

Полиарилаты - термопластичные полимеры, перерабатываются литьем под давлением или литьем прессованием. Детали узлов трения из полиарилата могут работать длительно при температуре 160 – 180 °С, кратковременно - при температуре 230 °С. Наряду с высокой теплостойкостью полиарилат обладает высокой сопротивляемостью ионизирующим излучениям, хорошими диэлектрическими свойствами, достаточной химической стойкостью, морозостойкостью (могут работать при температуре до -100 °С). Для улучшения антифрикционных свойств полиарилаты наполняют твердыми смазочными материалами. Упомянутые свойства полиарилатов показывают, что это весьма перспективный материал для деталей узлов трения, особенно для несмазываемых.

Другим перспективным материалом являются *полиимиды*. Это теплостойкие термореактивные полимеры, применяющиеся в качестве связующего при изготовлении композиционных антифрикционных материалов. На основе полиимидов выпускают композиты, наполненные дисульфидом молибдена и графитом. В последние годы разработаны материалы, наполненные углеродным волокном. Эти материалы обладают высокой радиационной и химической стойкостью, прекрасными триботехническими свойствами и могут длительно эксплуатироваться при температуре 220÷260 °С. Изделия из таких материалов получают в основном прессованием с последующим спеканием.

Высокой химической стойкостью и малым водопоглощением обладает полимер *пентапласт*. Его применяют для изготовления деталей узлов трения повышенной точности (шестерен, уплотнительных манжет, уплотнительных колец и т.д.). Детали из пентапласта можно длительно эксплуатировать при температуре 120÷130 °С, кратковременно - при 135÷150 °С. Пентапласт перерабатывают всеми методами на оборудовании, применяемом для термопластов. Коэффициент трения при давлении 5 МПа (температура 20 °С) для пары трения пентапласт-пентапласт составляет 0,13-0,15; для пары пентапласт-закаленная сталь - 0,11-0,13. Для повышения механических свойств в пентапласт вводят минеральные наполнители: графит, смолу, стекловолокно, окись хрома и др.

Полиформальдегидные смолы - термореактивные полимерные материалы, применяемые для изготовления деталей узлов трения в машиностроении (шестерни, втулки, муфты сцепления, подшипники, сепараторы и др.). Эти материалы обладают высокой стойкостью по отношению к органическим растворителям, действию горячей воды, растворов солей, морской воды, щелочей, растворов органических кислот. Изделиям из полиформальдегидов свойственна высокая жесткость, стабильность размеров, высокая износостойкость, стойкость к старению; их можно эксплуатировать при температуре до 120 °С. Коэффициент трения чистого полиформальдегида по стали без смазки - 0,30-0,35. Для повышения износостойкости и улучшения антифрикционных свойств полиформальдегид наполняют стекловолокном, фторопластом, дисульфидом молибдена, углеродным волокном, коксом, сажей, графитом. Введение в сополимер полиформальдегида 15-20% фторопласта снижает коэффициент трения в 1,5-2 раза, интенсивность изнашивания - в 3-4 раза.

Эпоксидные полимеры широко применяют при изготовлении деталей узлов трения. Они обладают хорошей адгезией к металлам и другим материалам, высокой механической прочностью, малыми усадкой и водопоглощением, вибро- и щелочеустойчивостью, хорошими электроизоляционными свойствами. В качестве наполнителей используют графит, кокс, дисульфит молибдена, нитрид бора, оксиды металлов, различные волокнистые материалы. Введение в эпоксидные смолы фурановых олигомеров и специальных добавок увеличивает твердость, жесткость, нагрузочную способность и износостойкость.

Композиционные материалы на основе эпоксидных смол применяют для изготовления деталей узлов трения, работающих в агрессивных средах и в вакууме при температурах от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, в воде, керосине и других средах.

Ещё одним классом трибополимеров являются полимерные самосмазывающиеся материалы.

Свойства материалов на основе фторопласта приведены в табл. 5.5., а на основе полиимидов - в табл. 5.6. Для повышения антифрикционных свойств полиимиды армируют и наполняют твердыми смазывающими материалами.

Таблица 5.5.

Характеристики материалов на основе фторопласта

Марка материала	Состав, %	Плотность ρ , кг/м ³	Прочность $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Твердость НВ, кг/мм ²	Теплопроводность, C_p , Вт/(м·к)	Коэффициент трения, f	Интенсивность изнашивания, $J_h \cdot 10^9$
Ф-4		2,18÷2,21	14,0÷35,0	30÷40	0,2	0,04	80÷100
Ф4К20	Ф-4, 80 Кокс, 2					0,06	0,75÷1,0
Ф4М15	Ф-4, 85 MoS ₂ , 15	2,25	13,5	50	—	0,07	0,5÷1,8
Ф4С15	Ф-4, 85 Стекловолокно рубл. 15	2,20	11-14	50÷60	—	0,08÷0,09	1,7÷2,0
Ф4К15М5	Ф-4, 80 Кокс, 15 MoS ₂ , 5	2,19	14	40	—	0,08÷0,09	1,7÷2,0
АМИП-15М	Ф-4, Ситал, MoS ₂	2,25	10÷14	46÷80	0,35	0,1÷0,12	1,8÷2,1
ФН-202	Ф-4, никель, Нитрид бора, MoS ₂	2,40	11÷18	40÷70	0,30	0,12÷0,15	28÷32
КРИОЛОН-3	Ф-4, 82 Углеродное волокно, 5 MoS ₂ , 3	2,21	22÷25	55÷60	0,36	0,08÷0,1	0,5÷0,7
КВН-3	Ф-4, бронза, PbO, кокс, MoS ₂						

Характеристики материалов на основе полиимида

Марка материала	Состав	Плотность, ρ , кг/м ³	Прочность $\sigma_{в}$, МПа	Удельная вязкость КС, кДж/м ³	Твердость НВ, кг/мм ²	Предельная рабочая температура, °С
ПА 6-1-203	ПА, графит	1,15	60÷72	18÷50	130	-60 ÷ 165
ЛАМ-1	ПА, графит, алюминевая пудра	1,18	53	20	200	-60 ÷ 165
ПА12-11-13	ПА, MoS ₂	1,03	49	3-7	85	-60 ÷ 165
ПА66ПЭ	ПА, полиэтилен	1,13	70	4	110	-40 ÷ 80
ПА610-1-103	ПА, графит	1,12	55	50÷80	—	до 120
ПА610-1	ПА, стекловолокно, MoS ₂	1,35	125	20÷50	—	до 120
САМ-3	ПА, добавки	1,30	55	40÷50	130	до 100
САМ-5	ПА, графит, добавки	1,16	47	35÷51	95	до 100
ПНС610-Т10	ПА, тальк	1,16	50÷60	50÷80	—	до 120
МАСЛЯНИТ КСПЭ	ПА, стекловолокно, полиэтилен, медь	—	—	30	80	-50 ÷ 200

Материалы на основе полиимидов

Полиимиды отличаются высокой термической и термоокислительной устойчивостью. Они начинают разлагаться на воздухе только в области температур 350 – 450 °С, а в вакууме или инертной среде - при 500 °С. Полиимиды относятся к самым радиационностойким материалам, что в сочетании с малой летучестью делает их перспективными для применения в узлах трения, работающих в вакууме. Изделия из полиимидов могут длительно эксплуатироваться при температуре 200÷260 °С. Например, полиимид ПМ-69 сохраняет 90% прочности при изгибе после 500 ч работы при 250 °С и после 100 ч работы при 300 °С. Ценным свойством полиимидов является высокое сопротивление ползучести, особенно при высоких температурах. Возможность применения полиимидов для изготовления деталей высокой точности обеспечивается их малой усадкой (0,7-1,0%) при прессовании и спекании и небольшим (0,2-0,3%) водопоглощением.

В табл. 5.7. приведены составы и основные свойства самосмазывающихся композиционных материалов на основе полиимидов. Коэффициент трения этих материалов с увеличением скорости скольжения снижается. Детали узлов трения получают горячим прессованием. Для изготовления пористых изделий, например подшипников, к полиимиду добавляют полиформальдегид. При температуре до 340 °С наиболее эффективно работают композиции, содержащие 45% графитиро-

Характеристики материалов на основе полиимида

Марка материала	Состав материала	Плотность ρ , г/см ³	Прочность, $\sigma_{в}$, МПа	Ударная вязкость КС, кДж/м ²	Твердость НВ, кг/мм ²	Предельная рабочая температура, °С
Полиар-2	ПМ-67, MoS ₂	1,3	—	50	140	-196 ÷ 300
Тесан-38	ПМ-69, MoS ₂	1,3	—	30	140	-196 ÷ 250
ПМ-67-ДИ-3	ПМ-67, MoS ₂	1,43	90÷130	20÷70	210÷310	-196 ÷ 250
ПМ-69-ДМ-3	ПМ-67, MoS ₂	1,45	85÷120	30÷50	210÷280	до 250
ПМ-67-Г10	ПМ-67, графит	1,45	70÷98	8÷30	230÷330	до 250
ПМ-69-Г5	ПМ-69, графит	1,47	70÷90	20÷40	220÷330	до 250
ПАМ 15-67	ПМ-67, графит	1,42	80÷100	16÷30	300	-196 ÷ 250
ПАМ 15-69	ПМ-69, графит	1,42	65÷80	7,8	330	-196 ÷ 250
ПАМ 50-67	ПМ-7, графит, нитрид бора	1,62	44÷45	1,5÷5,0	270÷300	-196 ÷ 250
ПАМ 50-69	ПМ-69, графит, нитрид бора	1,5÷1,6	30÷38	5,0	300	-196 ÷ 250

ванного волокна (коэффициент трения снижается до 0,05 - 0,10) при допустимом контактном давлении 350 МПа.

Подшипники, изготовленные из наполненного полиимида с хаотично ориентированными графитированными волокнами, надежно работают при давлении до 28,5 МПа и имеют износостойкость при 50 и 315 °С соответственно в 7 и 1,5 раза большую, чем в случае ориентации графитовых волокон вдоль направления скольжения. Для работы в области криогенных температур применяют полиимиды, наполненные бронзой. Фирма "Баден" (США) разработала самосмазывающиеся шарикоподшипники, работоспособные в интервале температур -50 +260 °С при частоте вращения до 800 с⁻¹. Сепаратор этих подшипников изготовляют из пористых полиимидных материалов SP-8 и SP-811.

Недостатком материалов на основе полиимидов является большая скорость газовыделения, что в некоторых случаях ограничивает их использование в вакуумной технике, а также хрупкость, предъявляющая особые требования к технологии обработки деталей. Кроме того, эти материалы имеют высокую стоимость. Поэтому их применяют лишь для изготовления ответственных деталей подвижных сопряжений, работающих в экстремальных условиях.

Материалы на основе поликарбоната

Композиционные материалы на основе поликарбоната относятся к перспективным для деталей узлов трения благодаря высоким механической прочности и ударной вязкости, стабильности свойств и размеров деталей в широком интервале температур, стойкости к атмосферным воздействиям. Эти материалы устойчивы к ультрафиолетовому излучению и резким перепадам температур, но имеют ограниченную стойкость к действию ионизирующего излучения.

Материалы на основе поликарбоната применяют для деталей уплотнений, клапанов и других элементов, работающих в вакууме, в инертной газовой и других средах при температурах $-50 \div 110$ °С. В табл. 5.8. приведены состав и свойства некоторых материалов на основе поликарбоната.

Таблица 5.8.

Материалы на основе поликарбонатов

Марка материала	Основные компоненты	Плотность, г/см ³	Прочность, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²	Твердость НВ, кг/мм ²	Предельная рабочая температура, °С	Метод переработки
ДАК-8	Поликарбонат, фторопласт-4	1,23	50÷55	105	87	115	Литье под давлением
Эстеран-29	Поликарбонат, MoS ₂	1,30	—	6	200	110	Прессование
Эстеран-35	Поликарбонат, MoS ₂	1,41	52	30÷70	140	110	Литье под давлением
Эстеран-51	Поликарбонат, MoS ₂	1,25	60	100÷200	100	110	Литье под давлением
ДАК-12-3BN	Поликарбонат, BN	1,20	55	—	90	110	Литье под давлением
ДАК-УП5Д	Поликарбонат, графит	1,25	90	—	—	—	Литье под давлением

Триботехнические характеристики композиционного материала ДАК-8 при трении на воздухе и в вакууме в различных контактных парах приведены в табл. 5.9.

Для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости в поликарбонат вводят специальные наполнители и твердые смазки. Введение дисульфида молибдена, графита или 15-20% фторопласта - 4 снижает коэффициент трения в 2-3 раза. К недостаткам поликарбоната следует отнести склонность к образованию микротрещин в поверхностном слое под влиянием остаточных напряжений после механической обработки и вследствие инородных включений и микропор. Поэтому обязательной финишной операцией должна быть термообработка для снятия остаточных напряжений.

Таблица 5.9.

Результаты испытаний поликарбоната ДАК-8

Контактная пара	Материал контртела	Давление среды, Па	Контактное давление, МПа	Скорость скольжения, м/с	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания, 10^{-6}
Диск-сфера	сталь ШХ15	10	0,3	0,5	0,11	2,54
		10	0,3		0,12	123
Палец-диск	Сталь 12Х18Н10Т	10	0,3	0,5	0,08	13,0
		10	0,3		—	43,8
		10	1,0		0,14	0,029
		10	1,0		0,12	0,110
		10	2,0		0,15	0,37
		10	2,0		0,11	—
Торцовая Диск-диск	Сталь 12Х18Н10Т	10	1,0	0,5	0,04	0,27
		10	1,0		0,07	50
		10	2,0		0,06	67,6
		10	2,0		0,05	87,8

Материалы на основе полиэтилена

Термопластичный полиэтилен используется в качестве полимерной основы композиционных самосмазывающихся материалов благодаря своей низкой адгезионной способности, достаточно высокой механической прочности, химической инертности и хорошей технологичности. Наибольшее применение получил полиэтилен низкого давления (ПЭНД), имеющий более упорядоченную структуру макромолекул, более высокую степень кристалличности (75-85%), плотность, механическую прочность, модуль упругости при изгибе и теплостойкость.

Для улучшения триботехнических характеристик в ПЭНД вводят фторопласт-4, гексафторэтилен, дисульфид молибдена, графит, пентапласт, поликарпоамид, металлы.

В табл. 5.10. приведены основные физико-механические и триботехнические характеристики ПЭНД.

Таблица 5.10.

Характеристики ПЭНД

Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Относительное удлинение, %	Модуль упругости при растяжении, Мпа	Ударная вязкость, кДж/м ³	Твердость НВ, кг/мм ²	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Интенсивность изнашивания, $\cdot 10^{-9}$	Коэффициент трения
0,95	24÷42	50÷12000	650÷750	2÷120	49÷60	0,42÷0,44	1,75	0,1÷0,15

Экспериментальные исследования композиционных материалов на основе полиэтилена показывают, что повышение износостойкости у большинства композиций не сопровождается улучшением механических свойств, а в ряде случаев прочность и модуль Юнга снижаются при резком повышении износостойкости. У изделий из материала с волокнистым наполнителем значительно повышается размерная стабильность, а при использовании в качестве наполнителей металлических порошков резко увеличиваются теплопроводность, электропроводность и некоторые другие характеристики.

Материалы на основе полиарилатов

Широкое применение в машино- и приборостроении находят антифрикционные самосмазывающиеся материалы на основе полиарилатов для изготовления деталей подшипников скольжения и качения, предназначенных для работы в глубоком вакууме без смазки.

Полиарилаты марок Ф-1, Ф-2, Д-3, Д-4 и др. в чистом виде имеют высокий коэффициент трения ($0,35 \div 0,40$) и относительно невысокую износостойкость. С целью улучшения триботехнических характеристик и повышения теплостойкости в полиарилат добавляют фосфор, дисульфид молибдена, медь и серебро. Например, композиционный материал Делан-524 на основе полиарилата ДВ-101 с добавкой 15% (массовая доля) дисульфида молибдена обладает самой высокой теплостойкостью среди полимерных материалов, перерабатываемых литьем под давлением.

Чистый полиарилат марки ДВ имеет нестабильные триботехнические характеристики из-за высокой величины адгезионной составляющей силы трения в результате наличия гидроксильных групп и макромолекул.

Материалы на основе эпоксидных смол

Композиционные материалы на основе эпоксидных смол нашли применение для деталей трибосопряжений вследствие хорошей адгезии эпоксидных полимеров к металлам и другим материалам, высокой механической прочности, малой усадки и водопоглощения. Наряду с традиционными наполнителями (графит, кокс, дисульфид молибдена, оксиды металлов, различные волокнистые материалы и т.п.) в эпоксидные смолы вводят олигомеры, полиэтилен, кремнийорганические смолы, двуокись титана и другие специальные добавки, что значительно увеличивает твердость, жесткость, нагрузочную способность и износостойкость композиционных материалов. Свойства некоторых антифрикционных материалов на основе эпоксидных смол приведены в табл. 5.11.

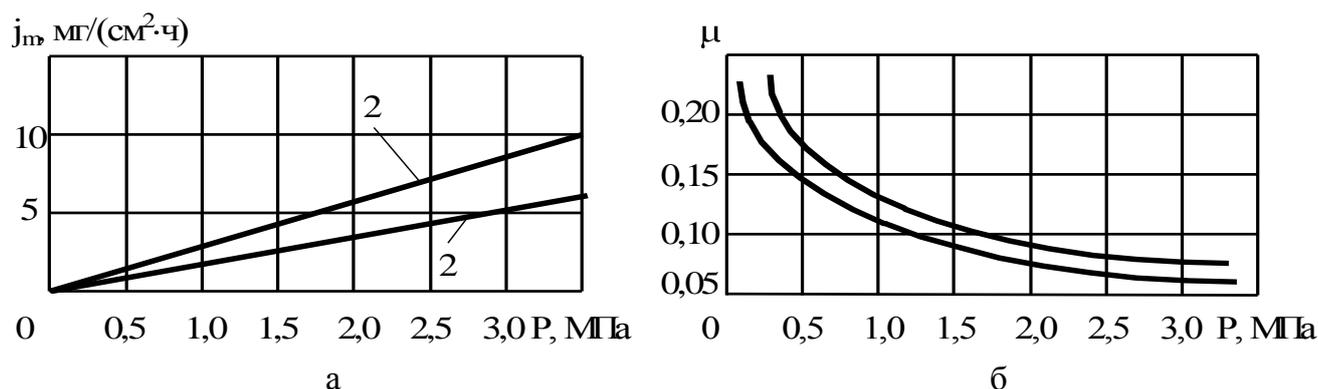
Наиболее широкое применение получили композиционные материалы марок АМС-1, АМС-3, АМС-5М, отличающиеся высокой механической прочностью, износостойкостью, термостойкостью и низким коэффициентом трения. Из этих материалов изготавливают поршневые кольца компрессоров, работающих без смазки, торцевые уплотнения, подшипники скольжения для узлов сухого трения с

Материалы на эпоксидной основе

Марка материала	Основные компоненты	Плотность, кг/м ³	Предел прочности МПа	Номинальное контактное давление, МПа	Скорость скольжения, м/с	Интенсивность изнашивания, 10 ⁻⁸	Коэффициент трения
АМС-1	Эпоксикремний - органич. смола, кокс, нитрид бора	1,77	—	5,0	0,5	0,1	0,08
АМС-3	Эпоксикремний – органич. смола, электродный графит, кристаллический графит	1,79	—	5,0	0,5	0,22	0,10
АМС-5М	Эпоксикремний - органич. смола, углеродная ткань	1,23	—	2,0	0,5	0,05	0,11
ЭДМА - 10	Эпоксидная смола, наполнитель	1,90	8,0	2,0	0,06	2,0	0,23
Э10Н5	Эпоксидная смола, графит, никель	1,35	9,5	0,65	1,0	1,2	0,35

нормальной влажностью при повышенных температурах, лопатки воздушных ротационных насосов.

Триботехнические характеристики материалов значительно зависят от условий эксплуатации. На рис. 5.16. приведены зависимости массовой скорости изнашивания и коэффициента трения от номинального давления при трении без смазки по стали 45 при скорости скольжения 1 м/с.



Р и с. 5.16. Зависимость скорости изнашивания (а) и коэффициента трения (б) от номинального контактного давления для материалов: 1- АМС -1, 2 -АМС-3

Повышение температуры от 50 до 250 °С вызывает снижение коэффициента трения композиционных материалов в 1,5÷2 раза, при дальнейшем повышении температуры до 300 °С коэффициент трения практически не изменяется или незначительно возрастает.

Материалы на основе фенолформальдегидных полимеров (ФФП)

Фенолформальдегидные полимеры (ФФП) широко применяют при создании антифрикционных полимерных материалов вследствие их повышенной термической и химической стойкости и износостойкости. Для улучшения триботехнических свойств вводят специальные наполнители (графит, свинец, MoS_2 , оксиды алюминия, железа и меди, а также базальтовые, стеклянные и углеродные волокна, технический углерод, асбест, различные волокна), что позволяет получить самосмазывающиеся материалы с низким коэффициентом трения без смазки (0,04-0,06) и интенсивностью изнашивания (10^{-9} - 10^{-11}) для подшипников скольжения, уплотнений, направляющих, работающих при повышенных температурах. Известны самосмазывающиеся материалы на основе ФФП следующих марок: АТМ-1, АТМ-1Т, Вилан-9Б, Синтек-2, АМАН-24. Материал марки АТМ-1 обладает высокими износостойкостью и теплопроводностью, но он хрупок, и поэтому его применяют в узлах трения, не работающих при ударных нагрузках. Для устранения этого недостатка используют волокнистые наполнители (углеродные и органические волокна) или ткани, например, в материалах марки Синтек.

Более подробные сведения о материалах узлов трения изложены в специальной литературе, список которой приведен в конце главы.

1.25. 5.3. Смазывание и смазочные материалы

5.3.1. Назначение смазочных материалов

Смазочные материалы предназначены для надежного разделения поверхностей трущихся деталей в условиях граничной, гидродинамической и эластогидродинамической смазки. Одновременно они должны снижать силу трения, интенсивность изнашивания, а также демпфировать удары и вибрации.

Смазочные материалы и системы смазки должны удовлетворять следующим требованиям:

гарантировано смазывать узел трения в заданных технических условиях эксплуатации интервалах температуры, давления и скорости скольжения;

поддерживать установленные значения функциональных показателей узла трения в пределах определенного срока эксплуатации и хранения;

не оказывать вредного воздействия на контактирующие с ними материалы;

быть экологически и пожаро-, взрыво-безопасными.

По агрегатному состоянию смазки делятся на жидкие, пластичные (консистентные) и твердые. Жидкие смазки – масла считают вязкими (ньютоновскими) жидкостями, предназначены они для использования в циркуляционных системах смазки. Пластичные смазки применяются для смазывания подшипников качения и шарниров в отсутствие циркуляции. Они закладываются при сборке в полости узлов трения. Твердые смазки используются в узлах, работающих обычно в экстремальных условиях: при высоких температурах, контактных давлениях, в глубоком вакууме, при заметном уровне радиации и др.

5.3.2. Смазочные масла, их физико-механические свойства и методики оценки характеристик

По своей природе масла (жидкие смазки) делятся на нефтяные (минеральные), синтетические, растительные и смешанные.

Минеральные масла состоят из продуктов перегонки нефти, полученных методами дистилляции из соответствующих фракций нефти либо остаточных после отгонки легких и маловязких фракций. Синтетические масла получают методами химического синтеза на основе силоксанов, эфиров фосфоновых кислот, фтор-, спирто-, глицериновых смесей и т.д. Такие масла обладают специфическими свойствами, например, огнестойкостью, сохранением текучести при низких температурах, слабой испаряемостью, неагрессивностью и др.

По своему назначению масла можно разделить на 4 группы:

моторные - для двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей;

трансмиссионные - для смазывания зубчатых, цепных и других видов передач;

индустриальные - для смазывания узлов трения промышленного оборудования: станков, прессов, прокатных станов и т.д.;

масла специального назначения: промывочные, компрессорные, холодильные, турбинные, веретенные, трансформаторные, консервационные и т.д. Отдельно имеются группы гидравлических и смазочно-охлаждающих жидкостей.

Поскольку масла должны обеспечивать гидродинамический режим трения, то их важнейшим показателем является вязкость. В связи с тем, что во время запуска и остановки узла трения, а также в зоне верхней и нижней мертвых точек поршня двигателей внутреннего сгорания имеет место граничное трение, то ответственной характеристикой является их задиростойкость, т.е. смазка должна предотвратить схватывание - самый опасный из видов износа.

В технике масла считаются ньютоновскими жидкостями, и поэтому сила трения в смазочном слое имеет вид

$$F = \eta \frac{dV}{dz} S, \quad (5.5)$$

где η - динамическая вязкость масла, V - скорость скольжения, Z - толщина смазочного слоя, S - площадь, на которой происходит сдвиг слоев смазки.

Для определения динамической вязкости используют ротационные вискозиметры. Вискозиметр состоит из двух коаксиальных цилиндров: внутреннего 1 и внешнего 2 (рис. 5.17), установленных в подшипниках корпуса прибора. Внутренний цилиндр приводится в равномерное вращение с угловой скоростью ω . Пространство между цилиндрами заполнено жидкой смазкой 3.

Внутренний цилиндр увлекает за собой примыкающий к нему слой смазки, и за счет внутреннего трения в этом слое вращение передается на наружный цилиндр, который удерживается от вращения пружинным динамометром 4, измеряющим момент трения.

Расчет вязкости по показаниям прибора рассчитывают в следующем порядке.

Поскольку $D-d \ll D$, $S \approx \pi DL$, полагая, что скорость слоев жидкости линейно

падает при переходе от внутреннего цилиндра ко внешнему,

$$\frac{dV}{dz} \cong \frac{2V}{D-d} = \frac{\omega D}{D-d}, \quad (5.6)$$

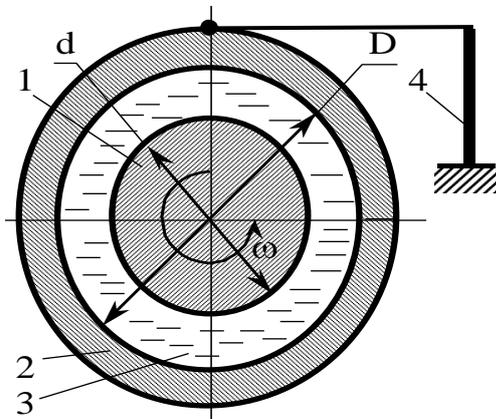
$$а \quad \eta = \frac{F(D-d)}{2\pi^2 n D^2 L}.$$

Здесь n - частота вращения внутреннего цилиндра; L - длина рабочей части цилиндров. В паспорте смазочных масел обычно указывается кинематическая вязкость, равная отношению динамической вязкости к плотности смазки:

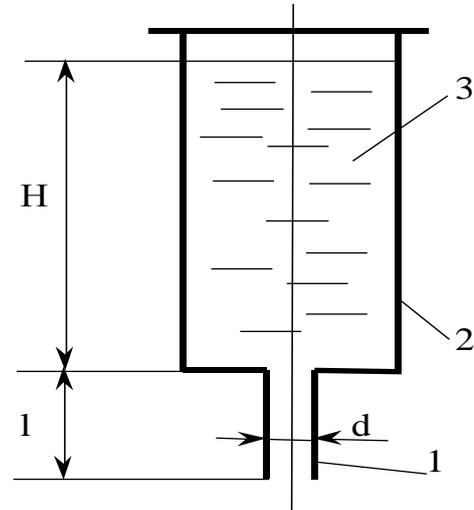
$$v = \frac{\eta}{\rho} = \frac{F(D-d)}{2\rho\pi^2 n D^2 L}. \quad (5.7)$$

Размерность кинематической вязкости в системе СИ - $\text{м}^2/\text{с}$, однако пользуются меньшей единицей - $\text{мм}^2/\text{с}$. Величина кинематической вязкости входит обычно в обозначение масла в Стоксах (1 Стокс = $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$). В производственных условиях используют более простые вискозиметры - капиллярные (рис. 5.18). Капилляр 1 длиной l , диаметром d является продолжением сосуда 2, в котором помещается изучаемая смазка 3. Используется формула Пуазейля, выражающая разность давления на границах капилляра:

$$\Delta p = \eta \frac{16\pi V l}{d^4 t}. \quad (5.8)$$



Р и с. 5.17. Схема ротационного вискозиметра



Р и с. 5.18. Схема капиллярного вискозиметра

Расчетная формула для определения кинематической вязкости имеет следующий вид:

$$v = \frac{d^4 \Delta p}{16\pi \rho V l} t = Ct. \quad (5.9)$$

Здесь $\Delta p = \rho g H$; t – время, за которое через капилляр вытекает заданный объем жидкости V ; C - константа прибора. Таким образом, определение кинематической вязкости сводится к определению времени, за которое вытекает определенный объем масла при заданном перепаде давления.

Вязкость масла сильно зависит от температуры, поэтому по международным и отечественным стандартам вязкость определяют при строго заданной температуре: 50 °С и 100 °С. Для оценки служебных свойств масла с учетом влияния температуры на вязкость используется индекс вязкости И:

$$C = \frac{v_0 - v}{v_0 - v_m} \cdot 100, \quad (5.10)$$

где v_0 - кинематическая вязкость худшего нефтяного масла при 40 °С, у которого вязкость сильно падает с ростом температуры; v_m - вязкость при 40 °С лучшего рафинированного масла, у которого вязкость слабо зависит от температуры, v - вязкость испытуемого масла при той же температуре. Если $v = v_m$, то $I = 100$. Следовательно, все смазки имеют индекс вязкости в интервале от 0 до 100. Как видно из формулы (5.10), индекс вязкости I служит для оценки служебных свойств смазки по ее термостабильности.

На рис. 5.19 показан вид кривых зависимости вязкости от температуры для двух смазок с разным индексом вязкости.

Чем выше индекс, тем меньше меняется вязкость с ростом температуры, тем лучше смазка.

Температурная зависимость вязкости описывается формулой Вальтера:

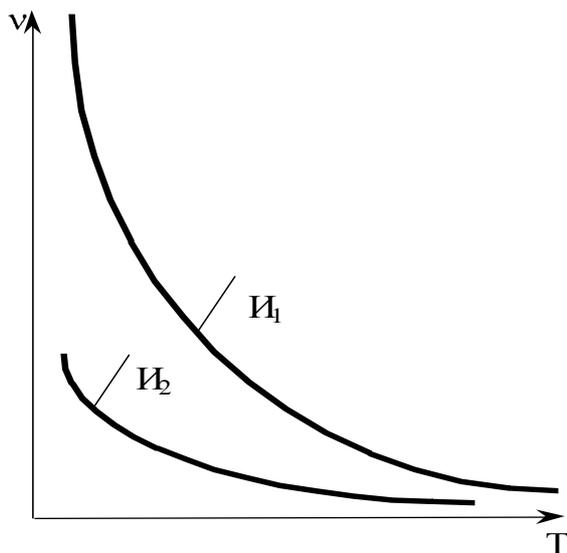
$$\lg \lg(v + 0,8) = A - B \cdot \lg T. \quad (5.11)$$

Обрабатывая опытные данные в соответствии с этой формулой, легко определить коэффициенты A , B .

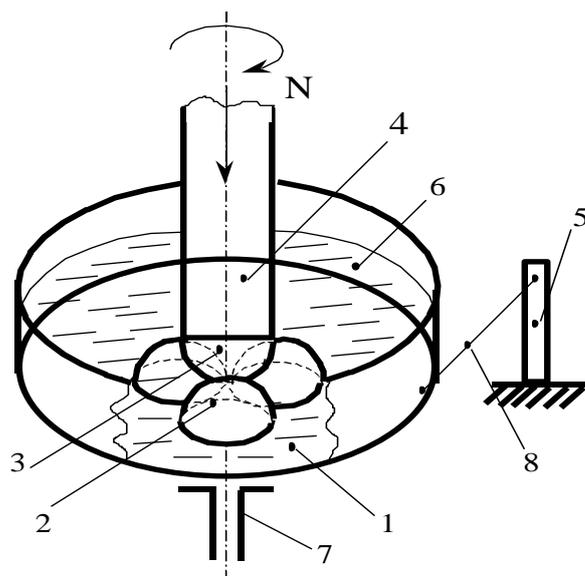
Важнейшим показателем является смазывающая способность, т.е. способность создавать на поверхности детали тонкую защитную пленку, препятствующую непосредственному контакту, а следовательно, адгезии, задиру и заеданию при металлическом контакте.

Смазывающую способность в основном обеспечивают противозадирные, противоизносные и антифрикционные присадки. Если смазывающая способность исчерпывается, то резко возрастают трение, износ, разрушение рабочих поверхностей вследствие схватывания и заедания.

Стандартные испытания противозадирных свойств масел производят на четырехшариковых машинах (ЧШМ). На рис. 5.20 представлена схема рабочего узла ЧШМ. Ко дну кюветы 1 прикреплены три равномерно расположенных по окружности шарика 2. Сверху на них опирается прикрепленный к пуансону 4 шарик 3, который прижат к шарикам 2 с заданным усилием. Кювета 6 заполняется испытуемым маслом. Шарик 3 через оправку 4 приводится во вращение и скользит по закреп-



Р и с. 5.19. Влияние температуры на вязкость



Р и с. 5.20. Схема рабочего узла 4-х шариковой испытательной машины

ленным шарикам. Кювета 6 расположена на подшипниковой опоре 7, но удерживается от поворота тягой 8, соединенной с динамометром 9.

Динамометр регистрирует момент трения, величина которого записывается на ленте самописца. В тот момент, когда исчерпывается смазывающая способность масла, происходит схватывание верхнего шарика с нижними, момент трения резко увеличивается, что видно по записываемой кривой, а испытание прекращается. Время испытания используется как мера оценки противоизносной способности масла. Одновременно измеряется диаметр пятна износа, образовавшегося на каждом из 3 закрепленных шаров. На некоторые масла диаметр пятна износа указывается в ГОСТ или паспортных данных. Таким же образом определяется эффективность противоизносных присадок.

5.3.3. Состав масел и механизм смазочного действия. Роль функциональных присадок к смазочным маслам

В производстве масел различают масла базовые и товарные.

Базовые масла по ГОСТ 18283-72 являются основой для получения товарных масел путем введения в них присадок различного назначения.

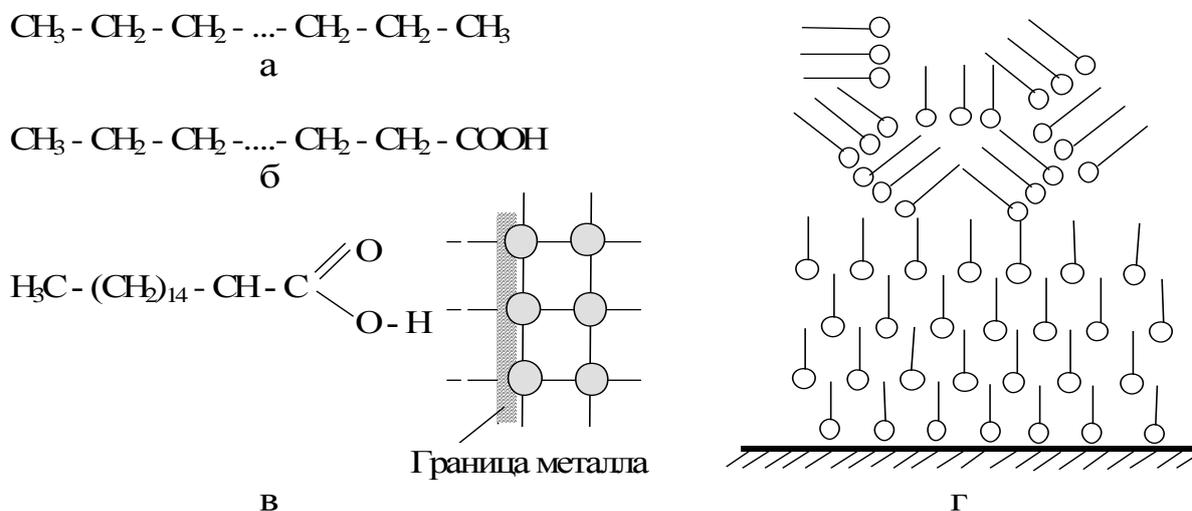
Как правило, базовые масла представляют собой продукты различного происхождения: дистиллятные или остаточные минеральные масла, фракции нефтей асфальтового основания, высокополимерные соединения, синтетические и растительные масла.

Так, например, моторное масло М-6 ($\nu_t = 100 \text{ }^\circ\text{C} = 11 \text{ мм}^2/\text{с}$) содержит 50% дистиллятного и 50% остаточного компонента. Соотношение между обоими компонентами определяет вязкость и индекс вязкости. В последние годы с учетом то-

го, что смазки на нефтяной и синтетической основе и сами технологии их производства экологически опасны, проявляется большой интерес к экологически чистым маслам растительного происхождения (рапсовое, соевое, кокосовое, подсолнечное и др.).

Для обеспечения служебных свойств смазочных масел разного назначения в базовые масла вводят присадки. Присадки бывают маслорастворимые органического происхождения и тонкоизмельченные твердые порошки органического и неорганического происхождения (наполнители), образующие гелеобразные структуры. Присадки снижают износ, силу трения, предотвращают схватывание, заедание, определяют ряд других служебных показателей.

В качестве антифрикционных и противоизносных присадок широко используются поверхностно активные вещества в виде жирных кислот и их солей - мыл. На рис. 5.21,а,б показана схема взаимодействия молекулы ПАВ с металлом (Me).



Р и с. 5.21. Механизм взаимодействия ПАВ с твердой поверхностью

В парафине $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{CH}_3$ метильная группа CH_3 заменяется на карбоксильную COOH . Парафин превращается в стеариновую кислоту $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{COOH}$. В дальнейшем кислота, вступая в реакцию с щелочными металлами Na, Ca, K, Li, может образовывать соли и мыла. Если вместо карбоксильной группы присоединится гидроксильная - OH, то образуется спирт жирного (парафинового) ряда. Жирные кислоты, их соли, спирты являются поверхностно-активными веществами. Активные группы интенсивно притягиваются активными центрами на поверхности металла. При этом боковые группы соседних молекул также взаимодействуют друг с другом. На поверхности твердого тела образуется молекулярный "ворс" (рис. 5.21,в,г). Мономолекулярный слой смазки служит как бы продолжением твердого тела, обладает прочностью и упругостью. К нему примыкают следующие слои молекул, ориентирующихся перпендикулярно к поверхности твердого тела. Однако по мере удаления от границы влияние твердой поверхности постепенно исчезает, твердообразные свойства смазки снижаются.

Через несколько слоев молекулы вследствие теплового движения дезориентируются. Если смазки достаточно лишь для образования монослоя, то картину контакта можно изобразить в виде, представленном на рис. 5.22. В точках контакта из-за высоких давлений монослои продавливаются и образуются площадки металлического контакта $\Delta A_{\text{гм}}$.

Вокруг них возникают зоны контакта с наличием смазочных слоев ($\Delta A_{\text{гс}}$).

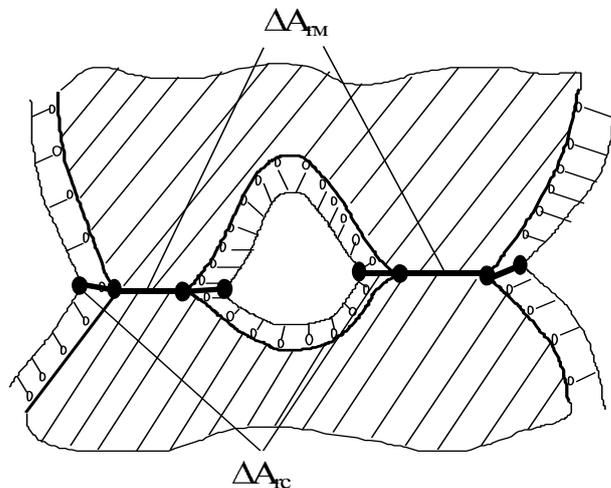
Наличие металлического контакта делает режим граничной смазки неустойчивым и ненадежным. Если не происходит переход к гидродинамическому режиму, то следует ожидать неприятных последствий: схватывания и заедания. Поэтому режим граничной смазки, который наблюдается во время пуска и остановки механизмов, должен быть непродолжительным.

Для смягчения режима трения в условиях граничной смазки, защиты поверхности детали от разрушения при прорыве молекулярного "ворса", а также в целях расширения диапазона нагрузок, температур и скоростей скольжения присадки содержат такие реагенты, как сера, хлор, фосфор, азот. Присадки, например Хлорэф - 40, представляют собой химически активные соединения, вступающие в реакции с металлом детали. В результате на поверхности возникает пленка из соединений активных элементов с металлом, представляющая собой прочно связанную с основой защитную мягкую прослойку. Однако необходимо учитывать опасность передозировки присадки и вовлечения в химическую реакцию глубинных слоев детали, сопровождающегося разрушением поверхностей сопряжения.

Для повышения вязкости смазки служат растворимые в маслах полимеры: полиизобутилен, полиметакрилат и др.

Особо ценными свойствами обладают присадки многофункционального действия, предотвращающие схватывание и заедание, снижающие трение и износ, например дитиофосфат цинка.

Моторные масла предназначены для смазывания двигателей внутреннего сгорания и работают в условиях тяжелого теплового режима. В двигателях внутреннего сгорания масло заливается в картер и с помощью насоса принудительно подается в сочленения шатунно-кривошипного и газораспределительного механизмов. Поршневая группа смазывается методом разбрызгивания. Температура в зоне первого поршневого кольца в карбюраторных двигателях достигает 270 - 280 °С, в дизельных – 300 - 330 °С. В картере средняя температура масла составляет 80 - 100 °С, в то время как температура газов, прорывающихся в картер, у карбюраторных двигателей 150 - 450 °С, а в дизельных достигает 500 - 700 °С. По-



Р и с. 5.22. Контакт при наличии монослоев смазки

этому масла должны обладать высокой термостабильностью - иметь высокий индекс вязкости. Моторные масла делятся на 6 групп (табл. 5.12).

Таблица 5.12.

Виды моторных масел

Группа	Подгруппа	Область применения
А	--	Не форсированные карбюраторные двигатели
Б	Б ₁	Малофорсированные карбюраторные двигатели
	Б ₂	Малофорсированные дизели
В	В ₁	Среднефорсированные карбюраторные двигатели
	В ₂	Среднефорсированные дизели
Г	Г ₁	Высокофорсированные карбюраторные двигатели
	Г ₂	Высокофорсированные дизели без наддува
Д		Высокофорсированные дизели с наддувом с отложением окислов, коррозий и износом
Е		Для лубрикаторных систем смазки цилиндров дизелей

Моторные масла обозначаются буквой М. В обозначении содержатся сведения о группе и подгруппе, кинематической вязкости и др. Например, масло М-10Г₂ - масло моторное группы Г, 2-й подгруппы с кинематической вязкостью при температуре 100 °С - 10мм²/с. Буква С говорит о наличии в масле синтетической составляющей.

В моторные масла вводится ряд присадок, повышающих эксплуатационные свойства: моющие (3-15%), диспергирующие нагар (1-2%), антиокислительные и противоизносные (до 2%), антикоррозийные (до 1%), а также вязкостные и антипенные.

Смазочные системы двигателей содержат масляные фильтры, в которых накапливаются продукты износа. Фильтры через определенное время эксплуатации подлежат замене. Однако наступает момент, когда масло исчерпывает свои служебные качества. В нем накапливаются продукты окисления, срабатываются присадки. Производится замена масла. Обычно она осуществляется вместе с заменой фильтра. При замене масла целесообразно промыть систему смазки. Для этого используются специальные промывочные масла либо моющие составы, вводимые в отработанное масло до его слива из системы. Моющие составы содержат реагенты, растворяющие нагар, обладающие высокой химической активностью. Поэтому при их применении необходимо строго следовать инструкции, чтобы не повредить рабочие поверхности и уплотнения.

Трансмиссионные масла предназначены для зубчатых, цепных и других механических передач. Они используются в коробках перемены передач, редукторах, дифференциалах мостов автомобилей. В зубчатых передачах контакт между зубьями осуществляется по линии, поэтому контактные давления велики и достигают 2 ГПа, скорость скольжения в цилиндрических передачах составляет до 12 м/с, в гипоидных - до 15 м/с, в червячных - до 20-25 м/с. Температура контакта достига-

ет 150 - 200 °С. В столь тяжелых условиях эксплуатации смазка должна гарантировать разделение контактирующих поверхностей, предотвратить задир и заедание, снизить износ и питтинговое разрушение. Кроме перечисленных требований смазка должна иметь стабильную вязкость, низкую температуру застывания, хорошие противокоррозионные свойства. Лучшее противопиттинговое действие имеют смазки на синтетической основе.

Служебные свойства в основном обеспечивают присадки. Наряду с растворимыми в качестве присадок используются стабильные суспензии графита, дисульфида молибдена и других нерастворимых компонентов, используются также химически активные соединения типа Хлорэф-40, а также антиокислительные и антипенные присадки. По своему назначению трансмиссионные масла делятся на 5 групп (табл. 5.13).

Таблица 5.13.

Виды трансмиссионных масел

Группа	Состав	Область применения		
		Тип передачи	Контактное давление, МПа	Температура, °С
1	Нефтяные масла без присадок	Цилиндрическая, коническая, червячная	900 - 1600	Не более 90
2	Нефтяные масла с противозносными присадками	— // —	Не более 2100	Не более 130
3	Нефтяные масла с противозадирными присадками умеренного действия	Цилиндрическая, спирально-коническая; гипоидная	Не более 2500	Не более 150
4	Нефтяные масла с противозадирными присадками повышенной эффективности	— // —	Не более 3000	— // —
5	Нефтяные масла с присадками многофункционального действия	Гипоидная, с ударным нагружением	Выше 3000	Выше 150

Трансмиссионные масла обозначаются буквой Т, например ТМ5-93. Это масло 5-й группы, 9-го класса вязкости (загущенное). Применяются и другие обозначения, например ТАД-17И(ТМ5-18). Это масло имеет основу в виде смеси дистиллята и остаточного компонента перегонки нефти и содержит импортную присадку АНГАМОЛ-99 многофункционального действия, включающую активные соединения серы и фосфора, дисульфид молибдена, а также антиокислительную и антипенную присадки.

Трансмиссионные масла обычно подаются в область контакта путем переноса из картера за счет окунания зубьев в масло либо путем разбрызгивания за счет создания смазочного "тумана". Для повышения эффективности смазывающего действия в последние годы разработаны способы подачи масла в зону зацепления с использованием магнитного поля постоянных магнитов. Для этого в масло до-

бавляется коллоидно-дисперсный порошок ферромагнетика, а вблизи от зоны зацепления размещается пара магнитов. Смазка, поступающая в зону зацепления, удерживается там магнитным полем и обеспечивает стабильное смазывание.

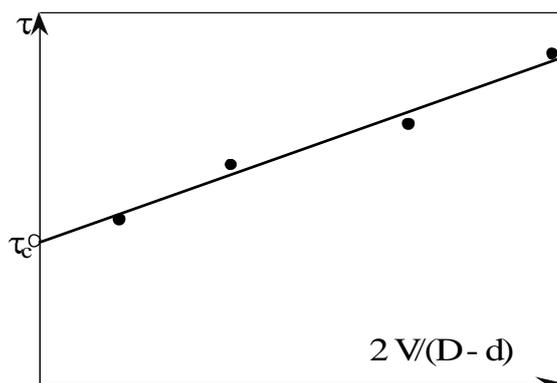
Пластичные смазки, которые также называют консистентными, представляют собой густые мази, предназначенные для смазывания подшипников качения различных типов, шарниров, рычажных, кулачково-эксцентриковых систем и др. В отличие от жидких масел пластичные смазки обладают сдвиговой прочностью, поэтому силу сопротивления смазки сдвигу представляют в виде

$$\tau = \tau_c + \eta \frac{dV}{dz}. \quad (5.12)$$

Как динамическую вязкость, так и сдвиговую прочность (τ_c), можно найти из результатов испытания смазки на ротационном вискозиметре. Для этого результаты измерения достаточно представить в виде графика, изображенного на рис. 5.23.

Сдвиговая прочность характеризуется отрезком отсекаемым на оси сопротивления сдвигу, а динамическая вязкость - тангенсом угла наклона графика к оси абсцисс.

Пластичные смазки обладают следующими достоинствами: удерживаются на наклонной и вертикальной поверхностях, не выдавливаются из контакта, обладают хорошей смазочной способностью в довольно широком интервале температуры, способны герметизировать узел, обеспечивают малый расход смазки, позволяют упростить конструкцию узла, снизить металлоемкость, сократить затраты на обслуживание. К числу недостатков относятся: низкий теплоотвод, отсутствие удаления продуктов изнашивания. Они больше, чем жидкие, склонны к окислению и распаду.



Р и с. 5.23. Определение сдвиговой прочности и вязкости

Пластичными смазками набиваются полости узлов трения. Замена смазки производится во время техобслуживания. В ряде узлов предусмотрено пополнение запаса смазки с помощью пресс-масленок.

Основой пластичных смазок служат нефтяные, синтетические или растительные масла. По типу загустителей смазки делятся на 4 группы:

- на мыльных загустителях;
- на неорганических загустителях;
- на органических загустителях;
- на углеводородных твердых маслорастворимых загустителях (парафины, церезины, битумы).

В первом случае используются соли жирных кислот - мыла, содержащие небольшое количество воды. Во втором и третьем случаях используются колоидно-дисперсные порошки минералов и полимеров. На поверхностях частиц сорбируются слои макромолекул смазки. Частицы вместе с прикрепившимися к ним активными группами молекулами смазки связываются друг с другом за счет промежуточных молекул. В результате возникает гелеобразная структура.

В состав смазок входят жидкие масла (50 - 90 %), загустители, модификаторы, присадочные добавки и наполнители. В качестве модификаторов, предназначенных для стабилизации структуры, используются смолы, жирные кислоты, вода. Присадочные добавки обеспечивают смазывающее действие и являются теми же, что используются в маслах. Наполнители - это твердые смазки (халькогениды металлов) дисульфиды, диселениды, дителлуриды, а также тальк, слюда, порошки мягких металлов (свинца, олова, кадмия, меди). Применение порошков мягких металлов позволяет создать на поверхностях трения защитные пленки, предохраняющие сопряжения от схватывания и заедания. Ту же роль выполняют твердые смазки.

Ряд смазок имеет специальное назначение: электроконтактные (проводящие), судовые (стойкие к речной и морской воде), резьбовые, шахтные, канатные, консервационные и т.д.

Наиболее часто применяется на автотранспорте смазка ЛИТОЛ-24, представляющая собой смесь нефтяных масел, загущенную литиевым маслом. Масло содержит противозадирные, противопиттинговые и другие присадки. ЛИТОЛ-24 применяется для смазки подшипников качения, шарниров, тихоходных подшипников скольжения и зубчатых передач. Смазки Фиол-1, Фиол-2у разработаны фирмой Фиат и предназначены для смазки игольчатых подшипников и шлицевого соединения карданного вала. Содержат дисульфид молибдена. Применяются в автомобилях, выпускаемых ВАЗом.

Смазка Шрус-4 содержит антиокислительную, противоизносную, противозадирную присадки, а также твердосмазочную добавку. Используется для смазывания шарнирных соединений автомобилей ВАЗ, КРАЗ и др. Наиболее распространенная пластическая смазка общемашиностроительного назначения Солидол-С представляет собой нефтяную жидкую основу, загущенную мылом. Модификатором структуры является вода, содержание которой составляет 2 - 4 %. Применяется для смазки тихоходных передач, подшипников, шарниров, ползунов, эксцентриксов и т.д. В настоящее время по своим параметрам Солидол-С является технически устаревшей смазкой.

Твердосмазочные материалы. К твердосмазочным материалам (ТСМ) относятся вещества, наносимые на поверхность деталей в виде пленок, имеющие сдвиговую прочность значительно меньшую, чем у материала детали. Иными словами, эти вещества должны обеспечить положительный градиент сдвиговой прочности в направлении внутренней нормали к границе твердой поверхности: $d\tau/dn > 0$.

В качестве твердых смазок используют:

слоистые вещества с резкой анизотропией прочности, обусловленной особенностями кристаллического строения;

тонкие пленки мягких металлов, их окислов;

пленки пластмасс;

химические соединения, образованные на поверхности детали путем обработки активными реагентами, содержащими хлор, фосфор, азот, серу и др.

ТСМ применяются:

при работе в условиях, когда жидкие и пластичные смазки не применимы из-за специфики эксплуатации узла, например в агрессивных средах;

в сопряжениях, работающих в условиях малых скоростей скольжения и высоких контактных давлений;

при высоких температурах, когда масла разлагаются, а также при низких температурах (криогенных), когда масла замерзают;

в условиях, когда недопустимо загрязнение окружающего пространства, при работе в жидких средах, в вакууме;

когда необходимо смазывать неметаллические поверхности, например керамику;

в скользящих электрических контактах с использованием проводящих материалов: графит, легкоплавкие мягкие металлы;

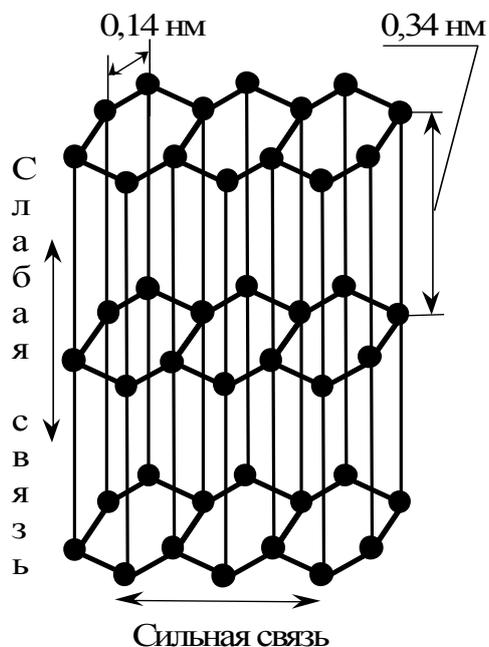
при воздействии радиации.

Наиболее распространенным типом ТСМ являются слоистые материалы: графит, дисульфиды, деселениды молибдена и др.

Рассмотрим свойства графита. Схема кристаллической решетки графита показана на рис. 5.24, триботехнические характеристики приведены в табл. 5.14.

Температура плавления графита равна $3800\text{ }^{\circ}\text{C}$, а пластичным он становится при температуре $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$. В отличие от дисульфида молибдена графит обладает худшими характеристиками в вакууме, а на воздухе, особенно влажном, - лучшими. Коэффициент трения как природного, так и пиролитического графита в вакууме более чем в 2 раза превышает коэффициент трения этих материалов на воздухе, что обусловлено десорбцией паров, влаги и газов и высокой когезией.

На рис. 5.24. показано, что в гексагональной кристаллической решетке графита расположены атомы углерода, связанные вдоль линий шестиугольников ковалентными силами. Связь между кристаллическими плоскостями, расстояния между которыми $0,34\text{ нм}$, осуществляется за счет слабых Ван-дер-Вальсовых взаимодействий, энергия ко-



Р и с. 5.24. Схема кристаллической решетки графита

Характеристики графита и бора

Материал	Коэффициент трения μ		Вакуум, Па
	на воздухе	в вакууме	
Графит:			
природный	0,19	0,44	$6 \cdot 10^{-7}$
пиролитический	0,18	0,50	— // —
Нитрид бора	0,25	0,70	$2 \cdot 10^{-7}$

торых на 3÷4 порядка ниже, чем у ковалентных. Поэтому сдвиговая прочность графита в направлении, параллельном заполненным атомами углерода кристаллическим плоскостям, намного меньше, чем в направлениях, соответствующих разрыву ковалентных связей. Эффект смазочного действия графита определяется тем, что молекулы воды, содержащейся в воздухе, сорбируются в межплоскостных промежутках и еще больше ослабляют межплоскостные связи. Поэтому смазочные свойства графита слабо проявляются в вакууме и при температуре более 100 °С. При отсутствии влаги коэффициент трения поверхностей, разделенных графитовой прослойкой, достигает 0,3, в то время как при наличии сорбированной влаги он составляет примерно 0,05. Это обстоятельство ограничивает использование графита. Однако в общем машиностроении графит нашел широкое применение для смазки сухих резьбовых соединений, канатов, поджимных сальниковых набивок, в качестве добавки в трансмиссионные масла и т.д.

Аналогичное строение имеют кристаллы дисульфида молибдена. Атомы молибдена связаны друг с другом прочными химическими связями вдоль сторон правильных шестиугольников. Атомы серы тоже химическими связями соединены с атомами молибдена и образуют разветвленную объемную структуру, отделяя соседние слои атомов молибдена друг от друга. Между атомами серы соседних слоев реализуются слабые Ван-дер-Вальсовы взаимодействия, а следовательно, вдоль границы раздела прослоек атомов серы реализуется низкое сопротивление сдвигу. Влага в данном случае не играет роли, поэтому дисульфид молибдена используется для смазки узлов, работающих в экстремальных условиях: в высоком вакууме, при температуре до 800 °С. Достоинствами графита и дисульфида молибдена является то, что они часто встречаются в природе в виде минералов, которые добываются промышленными способами.

Как следует из приведенных выше примеров, ТСМ принадлежат к слоистым соединениям. Они обладают высокой анизотропией прочности, выдерживают температуру более 400 °С, обладают высокой адгезией к металлу, малым газовыделением в вакууме, низким коэффициентом трения.

Как уже отмечалось, основные типы ТСМ - графит, дисульфид молибдена (MoS_2), дисульфид вольфрама (WS_2) и некоторые другие соединения (MoSe_2 , WSe_2 , NbSe_2 , PbI_2 , BN).

Так, например, слой MoS_2 может воспринимать статические нагрузки до $3 \cdot 10^3$ МПа и динамические - до 10^3 МПа, т.е. он практически работоспособен до давле-

ний, равных пределу текучести многих металлов, прекрасно работает в вакууме, сохраняя стабильность до температуры 1100 °С (на воздухе - до 450 °С).

Дисульфид вольфрама обладает большей теплостойкостью на воздухе (до 510 °С) и большей стойкостью к окислению, химически инертен, не растворим почти во всех средах (вода, масло, щелочи, кислоты); чувствителен лишь к воздействию свободного газообразного фтора, горячих серной и плавиковой кислот; нетоксичен и не вызывает коррозии металлов.

Коэффициент трения слоистых материалов зависит от толщины покрытия. При достаточно тонком покрытии значение коэффициента трения определяется слабым адгезионным взаимодействием между мягкой пленкой и материалом контртела и твердостью подпленочного материала.

С увеличением толщины покрытия возрастает роль самого покрытия.

На основе твердосмазочных материалов создаются покрытия (ТСП).

В качестве ТСП применяют пленки сульфидов (MoS_2 , WS_2 , PbS , NbS_2 и др.), селенидов (MoSe_2 , WSe_2 , NaSe_2 и др.), теллуридов (MoTe_2 , WTe_2 , NbTe_2 , TaTe_2), хлоридов (CoCl , PbCl_2 , CdCl_2 , CuCl), фторидов (AlF_3 , CaF_2 , BaF_2 , MgF_3), иодидов (CaI_2 , PbI_2 , BiI_3), оксидов металлов (PbO , Bi_2O_3 , $\text{PbO} + \text{SiO}_2$), графита, нитрида бора и др.

В табл. 5.15 приведены плотность, коэффициент трения и предельно допустимая температура эксплуатации некоторых сульфидов, селенидов и теллуридов металлов.

Таблица 5.15.

Характеристики ТСП

Соединения	Тип кристаллической решетки	Плотность, г/см ³	Коэффициент трения	Предельно допустимая температура эксплуатации, °С	
				вакуум	воздух
Bi_2S_3	Ромбический	7,40	0,07 - 0,14	500	--
CuS	Гексагональный	4,28	0,17 - 0,41	520	--
Cu_2S	Гексагональный	5,60	0,18	450	--
MoS_2	Гексагональный	4,8 - 5,16	0,02 - 0,3	1100	400
NbS	Моноклинный	5,9 - 6,0	0,04	1300	400
PbS	Кубический	7,5 - 7,59	0,37	410	500
TaS_2	Гексагональный	7,16	0,06	1500	--
WS_2	Гексагональный	7,5 - 7,63	0,03 - 1,6	1400	500
NbSe_2	Гексагональный	6,25	0,06 - 0,17	1350	350
TaSe_2	Гексагональный	--	0,08	900	575
MoSe_2	Гексагональный	6,90	0,03 - 0,22	1350	400
WSe_2	Гексагональный	9,0	0,02 - 0,18	1350	350
MoTe_2	Гексагональный	7,8	0,10 - 0,34	1240	400
WTe_2	Ромбический	9,44	0,27 - 0,49	1020	--
VTe_2	Ромбический	--	0,22	450	500

В промышленности применяют методы и технологии нанесения ТСП в зависимости от условий эксплуатации трибосистем (нагрузка, скорость скольжения, температура) и требуемого технического ресурса. Все методы можно разделить на три группы.

Первая группа. Нанесение покрытий из суспензий, состоящих из антифрикционного наполнителя, связующего вещества и растворителя. Суспензии наносятся напылением из пульверизатора с последующей сушкой и отверждением, возможно нанесение кисточкой или окунанием детали. Такие технологии применяют при нанесении покрытий, предназначенных для работы на воздухе, в вакууме и среде инертных газов при малых и средних давлениях, умеренных температурах и скоростях скольжения. В качестве связующего используют органические (фенольные, эпоксидные, кремнийорганические смолы) и неорганические (силикат натрия, фосфаты и бораты металлов) материалы. Представителями этой группы являются ТСП типа ВНИИ НП (ВНИИНП-209, ВНИИ НП-212, ВНИИ НП-213 и др.).

Вторая группа. Нанесение покрытий механическим (натираание, галтовка, виброгалтовка, ротапринт), физическим (катодный, ионный, плазменный, детонационный, газотермический, пневматический и др.), электрофизическим (электрофорез) и химическим способами.

Механические методы нанесения ТСП обеспечивают сцепление частиц, например частиц MoS_2 , благодаря их адгезии к металлу и внедрению в поверхностный слой при механических процессах натирания, галтовки, виброгалтовки и т.д.

При натирании и в ротапринтном методе (рис. 5.25) к одной из рабочих поверхностей сопряженных деталей подводятся под небольшим давлением специальный брусок, ролик или зубчатое колесо из спрессованного ТСМ, элементы из ТСМ могут также запрессовываться в виде смазочных вставок. В подшипниках качения вставки из ТСМ можно размещать на сепараторах.

Методы галтовки и виброгалтовки обеспечивают образование очень тонких слоев ТСМ, прочно удерживающихся на поверхности трения. Обработка в галтовочных аппаратах деталей подшипников качения порошком дисульфида молибдена позволяет получить после сборки подшипники, работающие без смазки.

Такая технология для ряда узлов трения внедрена на ВАЗе.

ТСП могут создаваться методом ионного напыления, когда ионами инертного газа бомбардируется мишень из твердого смазочного материала, а выбиваемые при этом частицы ТСМ с высокой скоростью встречаются с покрываемой поверхностью, предварительно очищенной ионами инертного газа. Методом ионного напыления на поверхностях стальных деталей получают покрытия из дисульфида молибдена, фторопласта и других материалов толщиной до 5 мкм.

Метод плазменного напыления реализуется в потоке плазмы инертного газа, в котором напыляемые материалы разлагаются при нагреве покрываемой поверхности до $100\div 200$ °С. Высокая скорость потока плазмы увеличивает плотность покрытия и обеспечивает его прочное адгезионное взаимодействие с металлом. Недостатком покрытий, получаемых этим методом, является их высокая пористость, составляющая $2\div 15\%$.

При детонационном методе частицы ТСМ в струе газов при направленном взрыве с большой скоростью бомбардируют поверхности деталей и прочно закрепляются в них. Этим методом получают покрытия толщиной до 100 мкм с достаточной прочностью и долговечностью.

Третья группа. Нанесение покрытий методами диффузионной химико-термической обработки металлических деталей некоторыми газами (сероводородом, сероуглеродом и др.). Отличительной особенностью покрытий, наносимых этим методом, является наличие в ТСП синтетического MoS_2 значительной толщины (до 100 мкм) и сохранение работоспособности в вакууме в широком интервале температур (-200 ± 850 °С). Этот метод позволяет получить более прочное сцепление покрытия с поверхностью детали, так как в этом случае имеет место не адгезия или механическое внедрение частиц, а их химическая связь с металлом.

Опыт применения ТСП весьма разнообразен. Так, например, наряду с однослойными применяют многослойные покрытия, например, покрытия с мягкой металлической подложкой. Подложку получают электролитическими методами, напылением в вакууме и др.

В наиболее ответственных случаях например, разъемы, электроконтакты, используют многослойные металлические покрытия, обеспечивающие плавное нарастание сдвигового сопротивления по мере углубления в поверхность. В стыковочных устройствах аэрокосмических объектов в качестве крайнего слоя применяют драгоценные металлы (золото, серебро, палладий и др.), обеспечивающие надежный электрический контакт.

В качестве полимерных покрытий обычно используют термопласты: капрон, нейлон, фторопласт и др. Часто в полимер добавляют в качестве наполнителя графит или дисульфид молибдена. Однако ТСП на основе термопластов эксплуатируется лишь в слабонагруженных узлах, поскольку при эксплуатации проявляются следующие недостатки: резкое падение прочности с ростом температуры, течение под нагрузкой, слабая адгезия к детали.

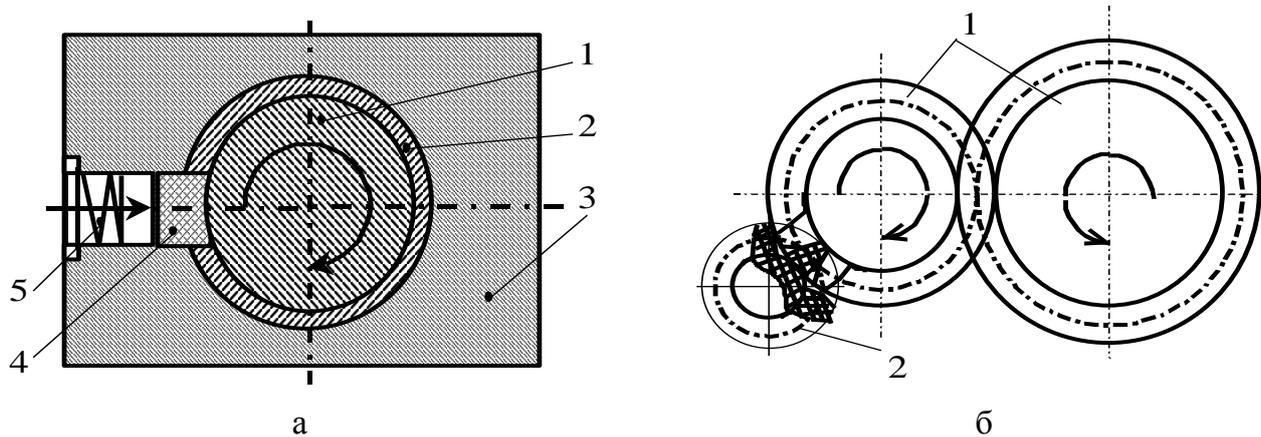
Весьма эффективны ТСП в виде мягких химических соединений, сформированных на поверхности химическим путем за счет обработки реагентами, содержащими хлор, иод, серу, фосфор. При этом на поверхности образуются тонкие прочно связанные с основой пленки хлоридов, иодидов, сульфидов, фосфатов.

Весьма целесообразно использовать приемы пополнения ТСП по мере изнашивания покрытия. К числу таких приемов относится ротапринтный метод пополнения запаса ТСМ на рабочей поверхности. На рис. 5.25 показаны некоторые варианты ротапринтного метода.

На схеме (см. рис. 5.25,а) показан способ подачи смазки в подшипник скольжения. Вал 1 вращается во втулке 2, установленной в корпусе 3. К поверхности вала постоянно прижат вкладыш 4 из ТСМ с помощью пружины 5. На схеме (см. рис. 5.25,б) зубчатая передача 1 постоянно смазывается за счет шестерни 2, изготовленной из армированного ТСМ.

Предпринимаются попытки управления смазочным действием ТСМ.

Так, в исследованиях А.А. Силина и Е.А. Духовского было установлено, что при обработке поверхностей, покрытых слоем ТСМ (графит, дисульфиды метал-



Р и с. 5.25. Реализация ротапринтного метода

лов и др.), пучком ускоренных ионов можно добиться резкого снижения коэффициента трения (аномально низкое трение).

Интересен прием применения ТСМ в поле постоянных магнитов. Здесь ТСМ смешивают с коллоидно-дисперсным ферромагнитным порошком. В зоне трения, например в зоне зацепления шестерен, размещается пара магнитов, создающих магнитное поле. Порошковая смесь подается в область зацепления и удерживается там магнитным полем, обеспечивая постоянную смазку контакта зубьев. Шероховатые чешуйчатые частицы ферромагнетика механически удерживают частицы ТСМ.

Основная номенклатура применяемых в России марок ТСП (табл. 5.16) и некоторые результаты по исследованию их триботехнических характеристик (рис. 5.26 - 5.28) приведены по данным Ю.К. Машкова.

На рис. 5.26 приведены кривые временной зависимости коэффициента трения MoS_2 на воздухе и в вакууме. Анализ кривых показывает, что коэффициент трения в вакууме в 2 раза ниже, чем на воздухе, при прочих равных условиях. Улучшение антифрикционных свойств MoS_2 в вакууме происходит благодаря отсутствию в вакууме влаги и уменьшению возможности окисления MoS_2 .

Присутствие влаги или паров органических жидкостей, таких, как спирт, ацетон, различные углеводороды, увеличивает коэффициент трения MoS_2 (рис. 5.29), что обусловлено химическими процессами, протекающими при фрикционном взаимодействии поверхностей трения.

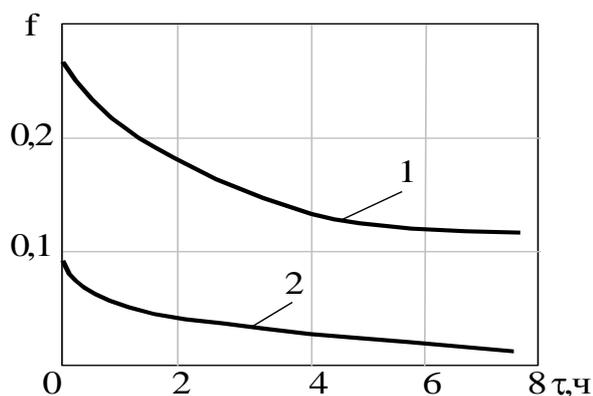
5.3.4. Опыт разработки и применения ресурсоповышающих фторсодержащих присадок к смазочным материалам

Здесь представлены полученные в Самарском техническом университете результаты разработки, испытаний и применения фторсодержащих материалов в качестве противоизносной антифрикционной присадки к смазочным материалам: маслам, пластичным смазкам, гидравлическим и смазочно-охлаждающим жидкостям.

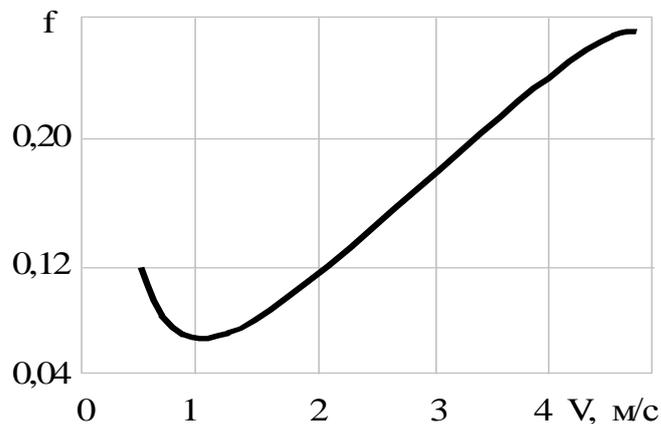
Таблица 5.16.

Характеристики и применение ТСП

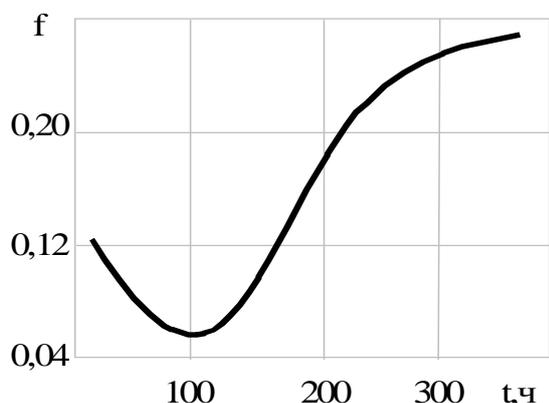
Марка ТСП, стандарт	Наполнитель, пленкообразователь, растворитель	Условия применения узлов трения	Рекомендуемая область применения
ВНИИ НП-209 ГОСТ 25287-82	MoS ₂ , кремний-органическая смола, бутилацетат	В атмосферных условиях и вакууме при высоких давлениях; интервал температур на воздухе -70÷+250 °С, в вакууме ТСП работоспособно при более высоких температурах	Подшипники скольжения и качения, шаровые опоры, резьбовые соединения, узлы трения с точечным, линейным и плоскостным контактом
ВНИИ НП-212 ТУ38 101594-80	MoS ₂ , мочевиноформальдегидная смола, этиловый спирт	В атмосферных условиях и вакууме при высоких контактных давлениях и низких скоростях скольжения при температуре -200÷+250 °С в вакууме и -120÷+200 °С на воздухе	Подшипники скольжения, шаровые опоры, шарниры, пары с возвратно-поступательным и вращательным движениями, узлы с точечным, линейным и плоскостными контактами
ВНИИ НП-229 ОСТ 381.28-83	MoS ₂ , силикат натрия, дистиллированная вода по ГОСТ 2874-82	В атмосферных условиях и в вакууме при температуре -60÷+350 °С. Покрытие может применяться для повышения износостойкости режущего инструмента	Высоконагруженные узлы трения с ограниченным ресурсом: подшипники скольжения, шаровые опоры; резьбовые соединения, узлы трения с различными формами контакта
ВНИИ НП-564 ТУ38 101939-83	MoS ₂ , графит и смола ФЛ-4С, дихлорэтан по ГОСТ 1942-74	В атмосферных условиях и в вакууме при высоких давлениях, малых скоростях скольжения при температурах -120÷+150 °С на воздухе, -150÷+200 °С в вакууме	Подшипники скольжения, шаровые опоры, шарниры; направляющие, узлы трения с линейным и плоскостным контактом
ЭО-НИТ-3 ТУ38 101107-6-86	MoS ₂ , полиаминоимидная и мочевиноформальдегидная смолы, диметилформамид	В атмосферных условиях и в вакууме в интервале температур -150÷+200 °С (кратковременно до 400°С)	Тяжело нагруженные узлы трения с возвратно-поступательным движением, низкими скоростями скольжения с ограниченным ресурсом
ФБФ-74Д ТУ 6-05-1617-78	Фторопласт-4Д, с полиамидным связующим	В атмосферных условиях и в вакууме, работоспособно в интервале температур -150÷+125 °С	Подшипники скольжения, шаровые опоры, шарниры, цилиндрические фиксаторы и стопоры, узлы с линейным и плоскостным контактом. Для защиты от коррозии



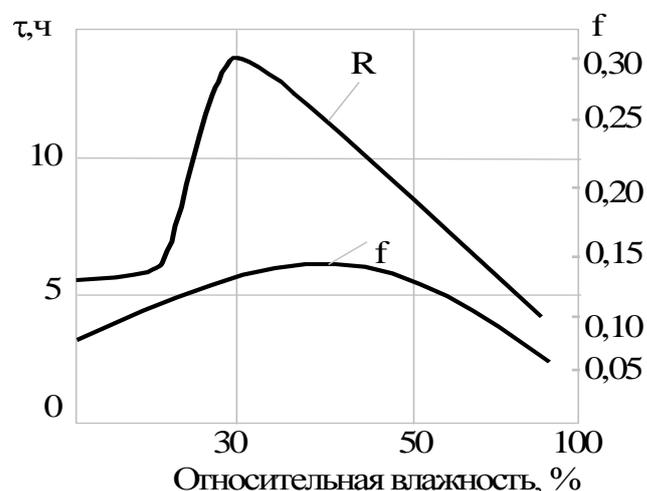
Р и с. 5.26. Зависимость коэффициента трения покрытия MoS_2 от продолжительности испытания: 1 – на воздухе; 2 – в вакууме ($P_a=0,2$ МПа ; $v = 0,7$ м/с)



Р и с. 5.27. Зависимость коэффициента трения покрытия MoS_2 от скорости скольжения ($P_a = 50$ Мпа; торцовая пара трения диск-диск, диск из бронзы)



Р и с. 5.28. Зависимость коэффициента трения покрытия MoS_2 от температуры поверхности трения ($P_a=0,4$ МПа; торцовая пара трения диск-диск)

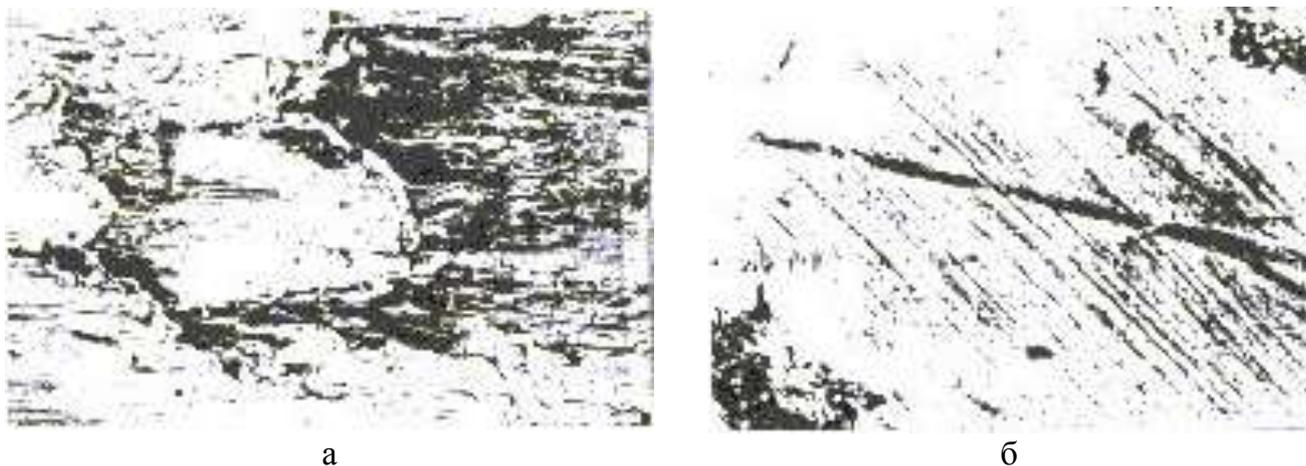


Р и с. 5.29. Влияние влажности воздуха на коэффициент трения и технический ресурс R пленки MoS_2 на стальной поверхности ($P_a = 5$ МПа , $v = 1$ м/с)

Носителем фтора является фторированный графит или карбонофторид. Карбонофторид представляет собой не растворимый в масле мелкодисперсный порошок белого или серого цвета.

Карбонофторид является одним из многих, но особенно интересным компонентом присадок суспензионного типа. Он отличается от других традиционных порошков графита, дисульфида молибдена, ультрадисперсных алмазов и т.п. тем, что не только снижает трение за счет механического эффекта "пудры". Разработанная присадка получила название «Стойкость». Основной эффект, обеспечивающий положительный результат от действия присадки "Стойкость" в смазочных средах, заключается в физико-химическом взаимодействии фторированного

графита $(CF_x)_n$, вводимого в присадку, с поверхностями трения. В зоне трения радикалы фтора реагируют с металлическими поверхностями и образуют на них гладкий эластичный слой фторидов металла, отличающийся от обычной окисленной поверхности своими свойствами. Такие поверхности становятся более гладкими, выдерживают большее число циклов нагружения до наступления выкрашивания, хемсорбируют смазку и отталкивают воду – источник водорода, разъедающего поверхность (фото на рис. 5.30).



Р и с. 5.30. Электронные фотографии изнашиваемых поверхностей $\times 10000$:
 а – типичный вид оксидов, возникающих при трении;
 б – поверхность покрыта однородной пленкой фторидов железа

Энергия активации пластической деформации поверхностей после приработки в маслах, содержащих $(CF_x)_n$, например на стали 40Х, возрастает с 40 до 90 кДж/моль.

1.26. Характеристика карбонофторидов

Карбонофториды типа $(CF_x)_n$ получают в результате беспламенной реакции графита и свободного фтора при температуре 420°C . Частицы имеют кристаллическую структуру, образуемую равноотстоящими слоями атомов углерода и фтора, химически активны и несут отрицательный электрический заряд (рис. 5.31).

Свойства карбонофторидов, обладающих высокой активностью, проявляются при их введении в трибосистему машин и механизмов. При этом в результате триботехнических реакций происходит образование ковалентных связей карбонофторида с металлом и в тонком поверхностном слое образуется фаза Fe-F-C, обладающая высокой износостойкостью и контактной выносливостью.

Активные ненасыщенные связи карбонофторидов на свободной поверхности деталей усиливают ее хемсорбционную способность по отношению к смазке, что стабилизирует и снижает трение. Кроме того, поверхности становятся гидрофобными. На основе этих данных авторами были разработаны карбонофторидосодер-

жащие присадки семейства "Стойкость" для прирабочных жидкостей, масел, консистентных и трансмиссионных смазок и СОЖ, защищенные Патентами РФ. Присадка "Стойкость" - серебряный лауреат Международной выставки в Брюсселе. Зарубежные и отечественные аналоги присадки "Стойкость" - прирабочная жидкость "Фомблин" фирмы "Монтедисон" (Италия); моторное масло фирмы "Продюи шимик южин кюльман" (Франция); присадка "Моликот" (США); присадка УР-357 (ФРГ) и др.

В результате применения карбонофторидов получено существенное повышение надежности, ресурса и КПД различных узлов трения. При стендовых испытаниях установлено повышение работоспособности газотурбинных авиационных двигателей, разрабатываемых СНТК им. Н.Д. Кузнецова. Добавка присадки в гидравлическую жидкость АМГ - 10 подкос-подъемника шасси самолета ТУ-154 прекратила схватывания и заедания в цапговых замках подкос-подъемника, а

ресурс работоспособности возрос более чем в 2 раза. При обкатке автомобильных дизелей Камаз в составах, содержащих карбонофториды, уменьшается интенсивность натиров и задиров на гильзах. Установлено, что введение карбонофторидосодержащей присадки в моторное масло повысило его противоизносные свойства до уровня, создаваемого одной из лучших зарубежных присадок УР-357 (ФРГ). При введении карбонофторидосодержащей присадки в СОЖ наблюдали повышение стойкости сверл, зубонарезного инструмента, разверток, протяжек и т.п. в 2-3 раза с одновременным улучшением качества обрабатываемых поверхностей.

Результаты различных испытаний присадок "Стойкость" приведены в табл. 5.17. и на рис. 5.32.

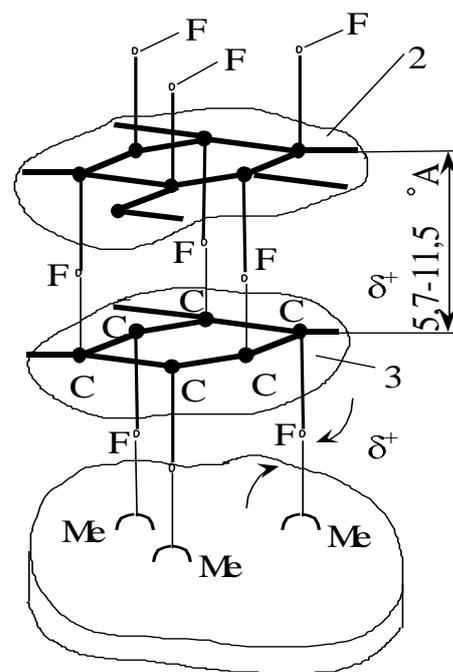
В настоящее время на базе карбонофторидных и аминоксодержащих компонентов созданы масла и пластичные смазки, превосходящие по четырем характеристикам аналоги ведущих зарубежных фирм (см. рис. 5.32):

- по противоизносным и противозадирным свойствам;
- по антифрикционности (наименьший коэффициент трения).

Дополнительная температурная стойкость смазочных материалов, содержащих «Стойкость», повышается за счет введения в присадку азотсодержащих компонентов.

Эффективность этой добавки в табл. 5.18. иллюстрирует пример повышения температурной стойкости масла при испытаниях по ГОСТ 23.221-84.

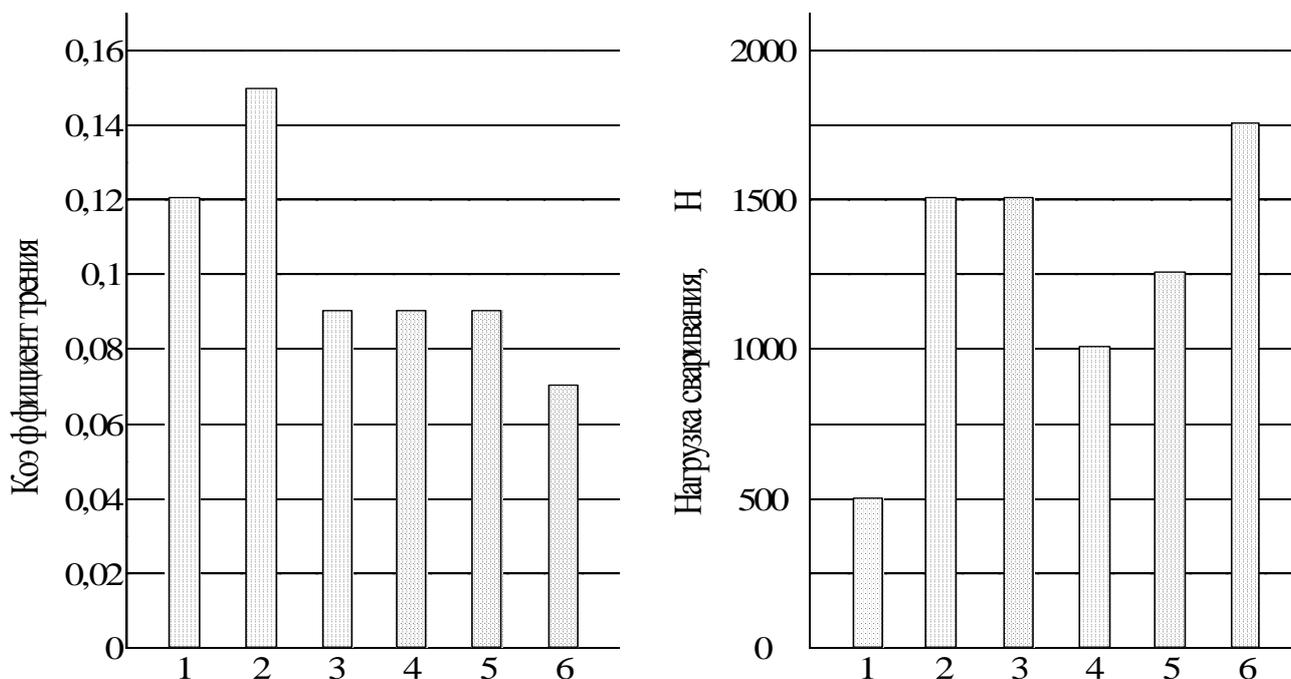
Не менее существенные улучшения служебных свойств получены при введении присадки "Стойкость" в пластичные смазки. Смазка "Ресурс" - аналог смазки ЦИАТИМ-203 - предназначена для использования в тяжелонагруженных шарни-



Р и с. 5.31. Структура карбонофторида

Результаты испытаний присадки "Стойкость"

№ п/п		
1	Институт по нормализации в машиностроении (ВНИИНМАШ) (Акт от 30.07.90 г.)	Проведены испытания на парах трения Ст45 и Ст45-АО-20 в масле М5 ₃ 10Г ₁ и М10Г ₂ К. Полученные результаты: ресурс смазочного действия увеличивается в 1,6 - 2 раза; коэффициент трения снижается на 19-29 %; температура в зоне трения снижается на 31-38 %.
2	АО "Волготанкер", Судоремонтный 3-д г. Астрахань (Акт от 21.09.90 г.)	Стендовые испытания двух дизельных двигателей 8НФД48АУ: снижение времени обкатки до 30%; снижение расхода топлива в среднем на 5%.
3	Объединение "Куйбышевавторанс" КГАТП-3, (Техническая справка от 18.12.90 г.)	Эксплуатационные испытания четырех автомобилей "Камаз": установлено сохранение эксплуатационных характеристик масла при наработке до 3 ресурсов.
4	Самарская область, (техническая справка от 14.12.90 г.)	Эксплуатационные испытания девяти тракторов К-700А, К-701 и МТЗ-80. Установлено сохранение эксплуатационных характеристик масла при наработке 3-4 ресурсов.
5	Горно-обогатительный комбинат "Арсарел-Медет" (Болгария)	Использование присадки "Стойкость" при обкатке двигателей большегрузных самосвалов БелАЗ уменьшило на 30% время обкатки при повышении характеристик работоспособности двигателей. При эксплуатации присадки установлено повышение ресурса моторного и трансмиссионного масел в 3 и более раз.
6	"Тюменьтрансгаз" (Станция Карпинская, июнь 1998 г.)	Газотурбинный двигатель НК-16 Ст (наземного применения) отработал на масле МС-8 с присадкой "Стойкость" 32 тыс. часов (около 6 лет) до капитального ремонта. При ремонте все узлы трения (подшипники, уплотнения, детали редуктора, аппараты маслосистемы и др.) не потребовали ремонта или замены.
7	"Лентрансгаз" "Югтрансгаз" 1994 - 1998 гг.	Введение присадки "Стойкость" в моторные масла для поршневых компрессоров 10 ГКН привело к повышению ресурса цилиндровых пар от 50% до двух раз. трения по всем аналогам); 3. По температурной стойкости; 4. По демпфирующей способности.



Р и с. 5.32. Результаты сравнительных испытаний присадки "Стойкость":
 1 - моторное масло М-6з/10 Г₁; 2 - с присадкой "LM" фирмы "Ликви Моли" (Германия); 3 - с присадкой "WM" фирмы "Вунс" (Германия); 4 - с присадкой "SLA-1" фирмы "Ачесон" (Германия); 5 - с присадкой "SLA-3" фирмы "Ачесон" (Германия); 6 - с присадкой "Стойкость".

Таблица 5.18.

Температурная стойкость масел

Объект испытаний	Температурная стойкость при испытаниях	
	Без добавки	После добавки
И-12, ГОСТ 20799-88	260 °С	400 °С
ТП-22, ТУ 38101821-83	250 °С	370 °С

рах шасси самолетов, систем управления и других подобных условиях с увеличенным периодом бесшумной работы. В дисперсную среду смазки введен карбонофторид типа $(CF_x)_n$. Характеристики смазки приведены в табл. 5.19.

Новой разработкой (1998 г.) является смазка "Ресурс-Ст" (табл. 5.20) аналог смазки широкого применения Литол-24.

Демпфирующее действие смазки проявляется в снижении так называемого эффекта бринеллирования подшипников при вибрационном нагружении.

При испытаниях шар-плоскость в контакт вводят испытываемую смазку, а затем налагают вибрационную нагрузку. Результаты приведены на рис. 5.33.

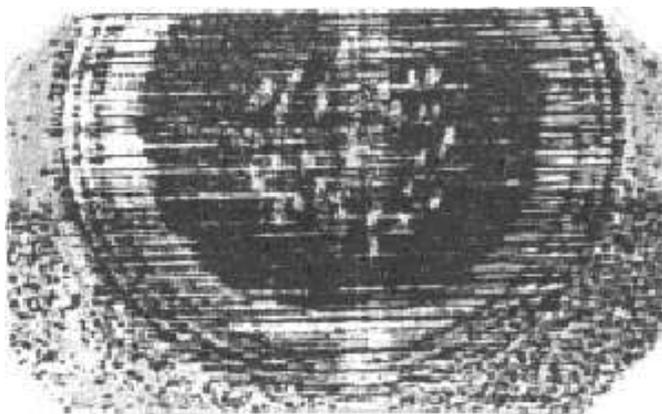
По данным заключительного акта испытаний на АО "Шар" пластичная смазка с карбонофторидосодержащей присадкой по сравнению с ЛИТОЛ-24 в 2÷2,5 раза уменьшила коэффициент трения и на 20÷30 °С температуру подшипниковых уз-

Характеристики смазки "Ресурс"

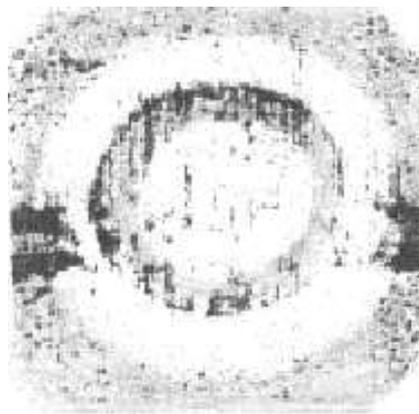
№ п/п	Характеристики	Значения
1.	Вязкость эффективная, Па·с (градиент скорости деформации до 10 с)	800÷1000.
	Отрицательная температура	- 50 °С.
2.	Предел прочности при 50 °С, Па	250÷500
3.	Коллоидная стабильность, %	5÷10
4.	Испаряемость за 1 час при 100 °С, %	5÷8
5.	Противоизносные свойства по сравнению с ЦИАТИМ - 203	Повышение не менее чем на 50 %

Сравнительные данные о свойствах смазок

Смазка	Критическая нагрузка		Пятно износа D _и , мм; время испытания – 1 ч, при Р,Н		δ _к , при J=70 дб	Индекс задир	Коэффициент трения при 180 °С	Температура каплепадения, °С	Пенетрация при 25 °С, ×10 ⁻⁴
	Р _к , Н	Р _с , Н	196	392					
Литол -24	670	1410	0,72	1,0	0,159	30,24	0,132	185	235
ЛЗ-31	654	1382	0,84	0,94	0,117	63	0,137	≥ 188	220÷250
ВНИИ НП-207	420	1780	>1,0	--	0,165	--	0,120	≥250	220÷245
ВНИИ НП-235	--	3150	1,68	--	--	25,9	0,145	--	325
ВНИИ НП-281	630	3780	0,51	0,66	--	--	0,145	--	326
ЦИАТИМ-201	280÷500	1000÷1580	0,69	>1,0	--	25,0	0,185	≥175	265÷310
Долотол НУ	1000	3100	0,56	1,2	--	75	--	≥ 140	250÷310
Shevron SR-1	--	1100	0,53	0,69	0,135	--	0,121	--	--
Andac-C	--	--	0,43	0,77	0,153	--	0,088	--	--
Albania-2	--	--	0,68	1,28	0,134	--	0,088	--	--
Ресурс Ст	1060	4220	0,37-0,56	0,48	0,32	59,5	0,052	>220	323



а



б

Р и с. 5.33. Бринеллирование в условиях вибронагружения:
а – при смазке ЛИТОЛ-24; б – при испытаниях смазки «Ресурс-Ст»

лов, снизила общий уровень вибраций на 0,8 дБ; ресурс работы подшипников качения возрос на 70%.

При промышленных испытаниях в электрошпинделях типа ЭН-2125 при шлифовании колец подшипников качения ресурс испытанных шпинделей возрос в 1,5 раза.

5.3.5. Требования к смазочным системам транспортных машин

Смазочные системы должны обеспечивать следующие требования обеспечения успешного функционирования узла трения:

надежный подвод масла на всех режимах работы двигателей ко всем трущимся деталям, охлаждаемым маслом поверхностям и устройствам, в которых масло используется в качестве рабочего тела (серводвигатели реверсирующих устройств двигателей, нагнетателей и регуляторов, гидравлические муфты приводов вентиляторов систем охлаждения и др.);

работу двигателей и их агрегатов в различных условиях окружающей среды и на всех эксплуатационных режимах;

заданную длительность работы двигателя без остановок для заправки маслом, регулировки и устранения недостатков в смазочной системе, очистки от отложенных примесей, шлама и нагара на поверхностях деталей двигателей и их агрегатов;

длительную работу масла и малый его расход.

Кроме того, они должны быть компактными, простыми и нетрудоемкими в обслуживании, иметь невысокую стоимость.

Исходя из условий работы двигателей, их типов и назначения степень удовлетворения этим требованиям может быть различной, что определяет сложность, стоимость, компактность смазочных систем и их элементов. Следует отметить четкую тенденцию конструктивного усложнения смазочных систем на всех типах двигателей не только вследствие расширения функций масла в силовых установ-

ках, но и для повышения надежности работы элементов двигателей, автоматизации обслуживания, повышения срока службы масла, снижения его расхода.

Основной характеристикой смазочной системы является циркуляционный расход масла в единицу времени G_M . Эту характеристику назначают по количеству теплоты Q_M , которое масло должно переносить как хладагент.

Количество масла, прокачиваемого через систему в единицу времени, кг/ч,

$$G_M = \xi N_e q / (\Delta T c_M), \quad (5.13)$$

где ξ - коэффициент запаса масла, необходимого на случай перегрузки и форсирования двигателя, нарушения герметичности соединений системы, увеличения зазоров при изнашивании, $\xi = 1,5 \div 3,5$; N_e - номинальная эффективная мощность двигателя, кВт; ΔT - перепад температуры масла на выходе из двигателя и на входе в него, для судовых и тепловозных двигателей $\Delta T = 5 \div 15$ °С; для автомобильных и тракторных с водомасляными охладителями $\Delta T = 20 \div 25$ °С и для тех же двигателей с воздухомасляными охладителями $\Delta T = 5 \div 8$ °С; c_M - теплоемкость масла, принимаемая равной 1,68-2,10 кДж/(кг·К).

Ниже приведены удельные количества масла, прокачиваемого через системы, л/(кВт·ч):

Двигатели без охлаждения поршней маслом:

<i>карбюраторные и газовые</i>	13,6 - 52
<i>тихоходные дизели</i>	6,8 - 18,6
<i>быстроходные форсированные дизели</i>	16,3 - 65
<i>Дизели с охлаждением поршней маслом</i>	27,2 - 68

Так как масло обладает большей вязкостью, а системы маслопроводов сильно разветвлены и оказывают большое сопротивление, то для прокачивания требуемого количества масла необходимо создание большого избыточного давления, которое для различных двигателей имеет следующие значения, Мпа:

<i>Быстроходные</i>	0,2 - 0,5
<i>Быстроходные форсированные</i>	0,6 - 1,5
<i>Тихоходные</i>	0,08 - 0,18

Объем масла в смазочной системе для уменьшения массы двигателя должен быть по возможности малым, но достаточным для заполнения всей системы, смазывания деталей и стенок картера и создания определенного запаса, компенсирующего расход масла между заправками двигателя. Этот расход для двигателей различных типов в зависимости от их износа составляет 0,2 - 3 % расхода топлива.

Ниже приведен удельный объем масла, л/кВт, заливаемого в смазочную систему с мокрым картером, для различных двигателей:

<i>Автомобильные карбюраторные</i>	0,03 - 0,15
<i>Тракторные карбюраторные</i>	0,34 - 0,48
<i>Быстроходные дизели</i>	0,07 - 0,21

Маслобак заполняют на 70-75 %, поскольку всегда имеет место выделения пара.

Второе требование к маслосистеме состоит в определении и обеспечении нужного давления масла на входе в узлы трения, разработке устройств для его отбора на выходе из узлов трения, определении общей мощности насосов, фильтров, предохранительных и отводных клапанов.

Рабочий процесс в маслосистеме обеспечивают масляные насосы различных типов: шестеренные, винтовые или плунжерные. Наибольшее распространение имеют шестеренные насосы. Несколько насосных пар могут образовать многосекционный насос высокой производительности и компактности.

Винтовые насосы имеют более высокий КПД и в них отсутствует пульсация давления. Они способны создавать давление до 2,5 МПа при частоте вращения до 6000 об/мин.

Плунжерные насосы применяют, когда требуется давление 6 - 10 МПа при небольших расходах.

При изнашивании шестерен, винтов или плунжеров уменьшается производительность насосов. Все виды насосов являются ремонтпригодными устройствами, в которых нередко применяют технологии восстановления изношенных деталей различными методами, что будет рассмотрено ниже.

1.27. 5.4. Методы обеспечения высоких эксплуатационных свойств узлов трения

5.4.1. Специфика конструирования узлов трения

Первый опыт разработки конструкции различных узлов трения создавался в прошлые эпохи независимо от развития науки. В современной технике одновременное развитие фундаментальных наук, технических дисциплин и трибологии позволило на практике создавать узлы трения высочайшего качества, работающие не только в транспортных и технологических машинах, но и в экстремальных режимах, высоких и низких температурах, в вакууме, при радиации, в химически агрессивных средах на земле и в космических условиях.

Однако и сегодня многие проблемы создания оптимальных по характеристикам узлов трения и научные достижения в этой области далеки от совершенства, так же, как узлы трения, созданные инженерами, далеки по совершенству от творения природы в растительных и живых организмах.

Область конструктивных способов обеспечения высокой работоспособности узлов трения охватывает системную группу проблем, каждый элемент которой должен получить оптимальное разрешение.

Круг основных направлений действий конструктора показан на схеме (рис. 5.34).

Приведенная схема по-разному реализуется в структурах конструкторских подразделений. На крупных автозаводах существует разделение служб, разрабатывающих новые изделия и сопровождающих выпуск изделий, переданных в серийное производство. Например, разработку новых моделей автомобилей ВАЗ ведет Департамент развития, включающий в себя научный центр, систему лабора-



Р и с. 5.34. Общая схема основных элементов создания конструкции, узлов трения

торий, опытных производств, испытательных баз (включая треки и полигоны дорожных испытаний), аэродинамическую трубу и другие подразделения, имеющие необходимые средства для разработки, исследования, испытания и доводки узлов трения.

В серийном производстве кроме служб технического контроля также имеются лаборатории, средства испытания и другие службы, входящие в схему обеспечения качества.

Ресурсные характеристики узлов трения регламентированы в нашей стране классами износостойкости. Значения износостойкости колеблются в широких пределах: $10^3 \div 10^{13}$. Сведения о классах износостойкости приведены в табл. 5.21.

В таблице 5.22 представлены данные о классах износостойкости ряда узлов трения автомобилей.

Приведем пример, вычисления линейного износа в конце эксплуатационного срока в парах трения: коренной подшипник-вкладыш и поршень-цилиндр. При путевом ресурсе в 100000 км и средней скорости 50 км/ч временной ресурс составляет 2000 ч. Если принять частоту вращения коленвала $n=3000$ об/мин и диаметр шейки вала 60 мм, линейная скорость составляет $V=\pi dn/60=10$ м/с. Путь трения $L=V \cdot t = 7,2 \cdot 10^7$ м. Для 12-го класса износостойкости $I=U^{-1}=10^{-12}$, а величина линейного износа $\Delta r=L \cdot I=0,072$ мм.

Для пары поршень-цилиндр при эксцентриситете коленвала 75 мм, путь поршня за 1 оборот составит $L_1=4 \cdot 75=300$ мм. Путь за 1 минуту - $L_m=3000 \cdot 0,3=900$ м. Путь за 2000 ч - $L \approx 1,1 \cdot 10^8$ м. Величина линейного износа к концу срока

Классы износостойкости

Класс	U	Класс	U
3	10^3-10^4	8	10^8-10^9
4	10^4-10^5	9	10^9-10^{10}
5	10^5-10^6	10	$10^{10}-10^{11}$
6	10^6-10^7	11	$10^{11}-10^{12}$
7	10^7-10^8	12	$10^{12}-10^3$

Износостойкость некоторых узлов трения

Узел трения	Класс
Цилиндро-поршневая группа	11-12
Колодочный тормоз	6-7
Дисковый тормоз	6-10
Подшипники скольжения коренные, латунные	11-12
Зубчатые передачи	5-8

эксплуатации достигнет величины $\Delta h = 0,1$ мм. Как видим, расчеты дают вполне реальные значения износа.

При создании узлов трения имеется ряд характерных триботехнических задач, на которые необходимо обратить особое внимание.

Выбор типа подшипников является одним из основных вопросов конструирования узлов трения.

В качестве критерия предварительного выбора типа подшипников используют показатель - произведение скорости вращения n (c^{-1}) на нагрузку P (Н), действующую на узел трения. В зависимости от величины этого произведения выбирают тип подшипника.

Общий диапазон реальных значений nP составляет $10^{-2} \div 10^7$ Н·с $^{-1}$.

В одном из вариантов, для удобства и быстроты решений, на основе практики конструкторской работы созданы номограммы, по которым предварительно выбирают тип подшипника: для радиальных (рис. 5.35) и для осевых упорных (рис. 5.36).

Номограммы ориентируют на выбор типов подшипников: скольжения без смазки, скольжения гидродинамические, гидростатические, пористые (из самосмазывающихся материалов) и качения.

Пример.

Средняя номинальная скорость вращения n коленчатого вала - 2000 об/мин или $33,3$ с $^{-1}$.

Расчетная нагрузка P на коренной подшипник - 3000 Н.

Диаметр вала - 70 мм.

$$n \times P = 33,3 \times 3000 \approx 10^4 \text{ Н} \cdot \text{с}^{-1}.$$

По номограмме (см. рис. 5.35) находим пересечение трех характеристик: P (Н), n (мин^{-1}) и n (с^{-1}). Оно указывает, что рассматриваемый случай относится к области применения подшипников скольжения. При окончательном выборе типа подшипников тщательно изучают прототипы проектируемых узлов трения, опыт их эксплуатации и особенности конструкции. После выбора базовой схемы ее дорабатывают по условиям Технического задания.

В целом конструкторы придерживаются ряда общих правил отработки узлов трения. Так, одним из общих правил проектирования узлов трения-скольжения является правило выбора материалов пары и структуры. Оно содержит правило выбора твердости и правило различия структуры.

Правило несовпадения твердости шипа и подшипника

Для благоприятного сочетания материал одной детали должен быть тверже другой. Принято, как правило, шипы валов изготавливать из термообработанных конструкционных сталей, нередко с покрытием (например твердый хром), имеющих высокую твердость $\text{HRC} = 40 \div 60$. Втулки или вкладыши подшипника изготавливают из сплавов цветных металлов (бронза, латунь, баббит и др.) с низкой твердостью $\text{HB} = 20 \div 30$ для баббитов, $\text{HB} = 40 \div 120$ для бронз, латуней и других металлических материалов.

Это правило учитывает практический опыт, заключающийся в том, что в такой паре поверхность шипа практически не изнашивается, поскольку является высокопрочной и твердой, касательные деформации от трения для нее не опасны, а поверхность втулки (вкладыша) пластична. Она не "боится" пластической деформации, поскольку легко ее реализует. Кроме того, в пластичных металлах непрерывно работает механизм релаксации, "залечивающий" возникающие повреждения.

Пары, у которых вал имеет большую твердость ($\text{H}_{\text{вала}} > \text{H}_{\text{подш.}}$), называют прямыми, при $\text{H}_{\text{вала}} < \text{H}_{\text{подш.}}$ - обратными.

Правило максимального различия размеров структурных составляющих материала

В прямой паре стальной шип – бронзовая втулка, структурные элементы стали (блоки мозаики) имеют размеры в долях микрометра (10^{-6}) мм, у бронзы - 10^{-4} мм.

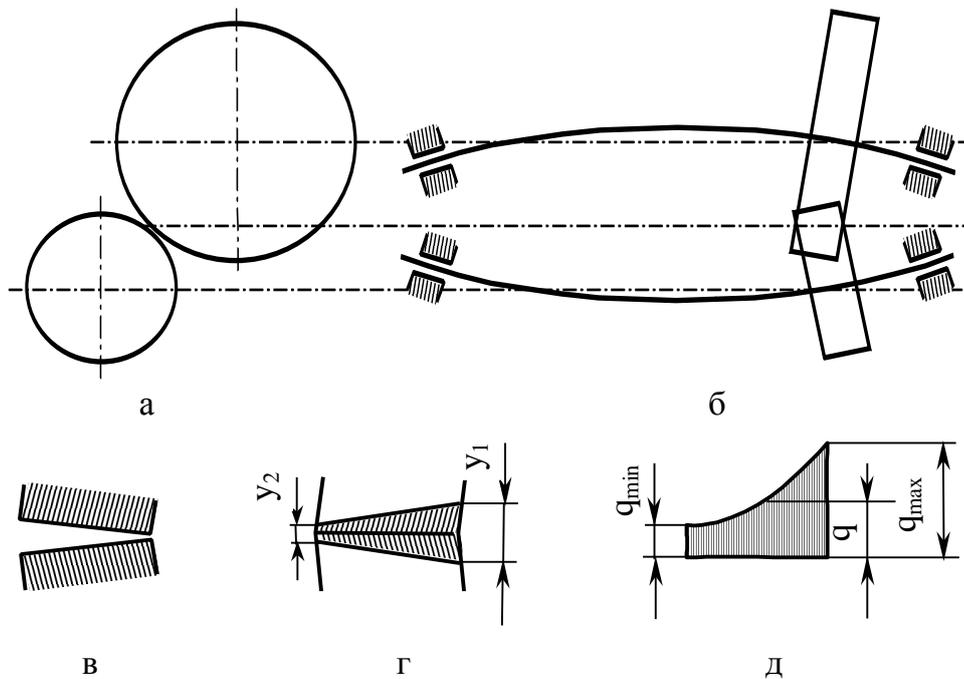
При подобном подборе разнородность свойств и размеров структурных составляющих предотвращает или снижает действие главного бича подшипников скольжения - схватывания и задиров.

Правило снижения концентрации контактных напряжений

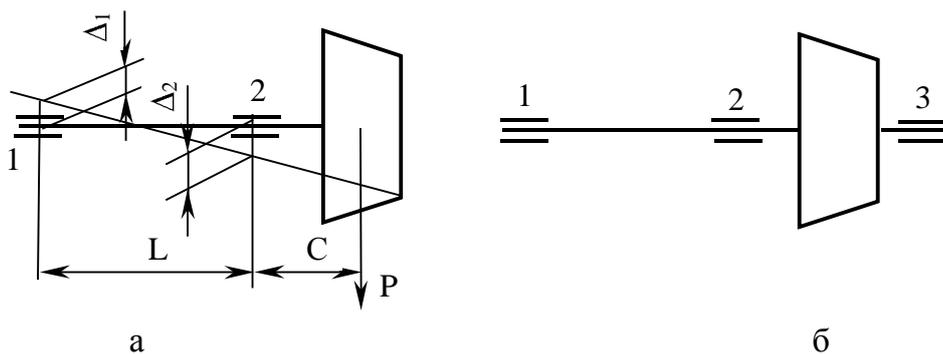
Деформация узлов трения под нагрузкой при действии рабочих температур, неточности формы, размеров и относительного расположения всегда создают концентрацию контактных напряжений на зубьях шестерен (рис. 5.37), в шипах и втулках подшипников скольжения, качения, прямолинейных направляющих и т.п.

Примеры такого рода упоминались при характеристике узлов трения двигателей и трансмиссий. Расчетными методами и проверкой при испытаниях выбирают конструктивные решения для достижения условия: $(g_{\text{max}} - g_{\text{min}}) \rightarrow \text{min}$.

Принципиально для этого имеется два пути:



Р и с. 5.37. Схемы деформации валов (а, б) и перекоса зубьев шестерен и образования концентрации нагрузки q по ширине зуба (в, г, д)



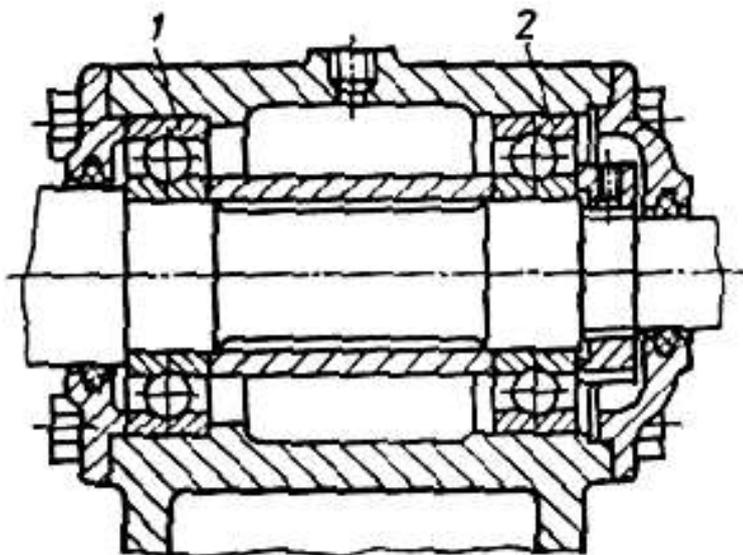
Р и с. 5.38. Консольное (а) и неконсольное (б) расположение конического колеса, снижающее деформацию вала и неравномерность нагрузки (Δ_1, Δ_2 - перемещения вала соответственно на опорах 1 и 2)

путь повышения точности и жесткости;
путь применения задаваемой податливости.

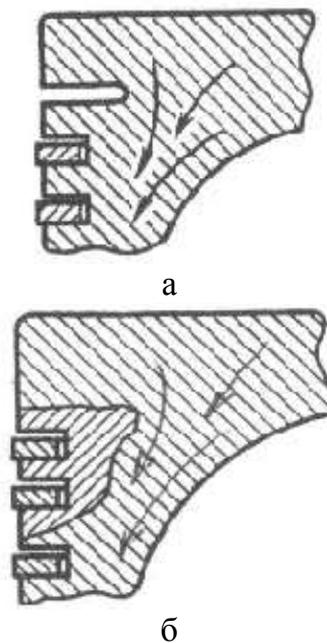
На рис. 5.38 приведен пример решения, когда введение дополнительной опоры 3 снизило деформацию зубчатого колеса под нагрузкой, и тем самым уменьшилась концентрация напряжений в пятне контакта шипа, подшипника и на зубьях.

Пример применения плавающей опоры (подшипник 2) иллюстрирует способ компенсации тепловой деформации (вал нагревается больше, чем корпус), (рис. 5.39).

Возможны конструктивные решения по уменьшению влияния тепловых деформаций. Например, устройства тепловой дамбы на поршне (рис. 5.40). В форсированных двигателях внутреннего сгорания и неохлаждаемых поршнях основ-



Р и с. 5.39. Опорный узел с шарикоподшипниками:
1 - закрепленная опора;
2 - плавающая опора

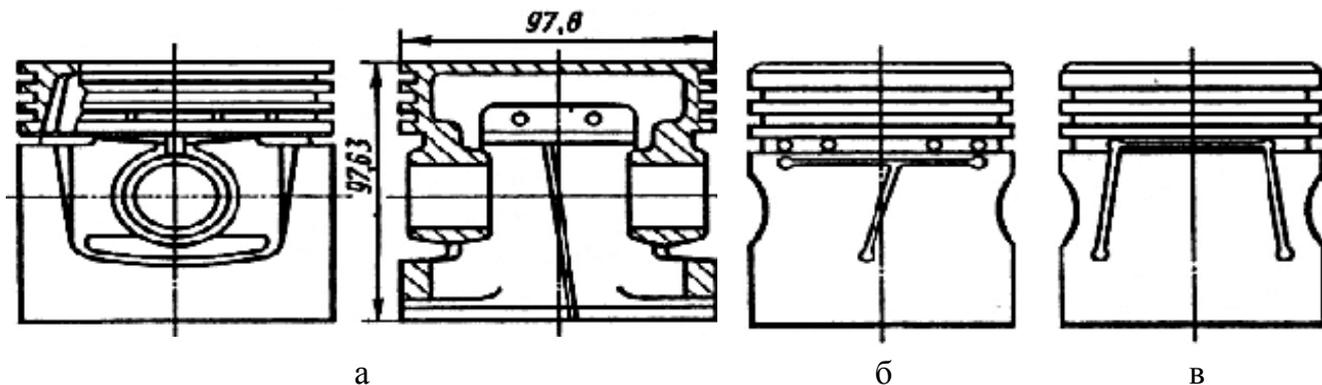


Р и с. 5.40. Тепловые дамбы поршней:
а - в виде прорези; б - в виде аустенитной проставки (в алюминиевом поршне)

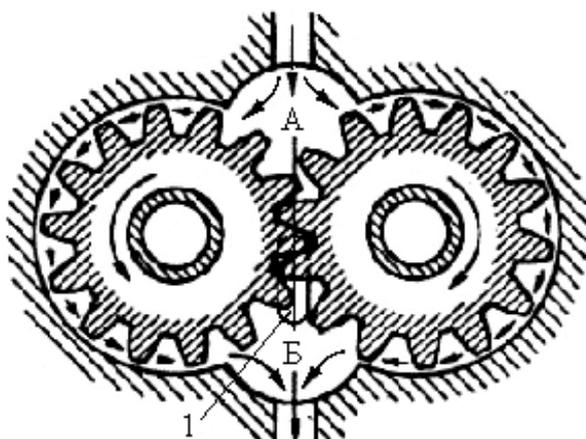
ным проводником теплоты являются поршневые кольца. В таких двигателях два верхних поршневых кольца могут перегреваться. Канавка или вставка обеспечивают большую равномерность нагрева верхнего и нижнего колец.

В двигателях легковых и грузовых автомобилей используют поршни из алюминиевых сплавов с жесткой головкой и разрезными цилиндрическими или овальными юбками (рис. 5.41). Головка поршня двумя длинными прорезями отделена от юбки, а последняя на одной из боковых сторон имеет косой разрез по всей длине. Такая конструкция придает юбке поршня упругость и способность деформироваться независимо от его головки. Это позволяет при ходовой посадке поршня в холодном двигателе избежать заедания при перегревах. Указанные прорези, кроме того, облегчают отвод в картер масла, снимаемого со стенок цилиндра маслосбрасывающими кольцами поршня при его прямом ходе. Поперечные прорези уменьшают отвод теплоты от головки поршня к его юбке и улучшают условия смазывания. Косой продольный паз предупреждает образование гребня в верхней части зеркала цилиндра, вызываемое износом. Продольные Т- и П-образные пазы юбки поршня не доводятся до нижнего ее обреза. Во избежание заедания неразрезанного нижнего пояса юбку поршня выполняют эллипсоидальной, с меньшей осью в направлении оси поршневого пальца. По большей оси эллипса холодный поршень образует с цилиндром посадку с зазором, при нагреве его юбка расширяется в направлении оси поршневого кольца.

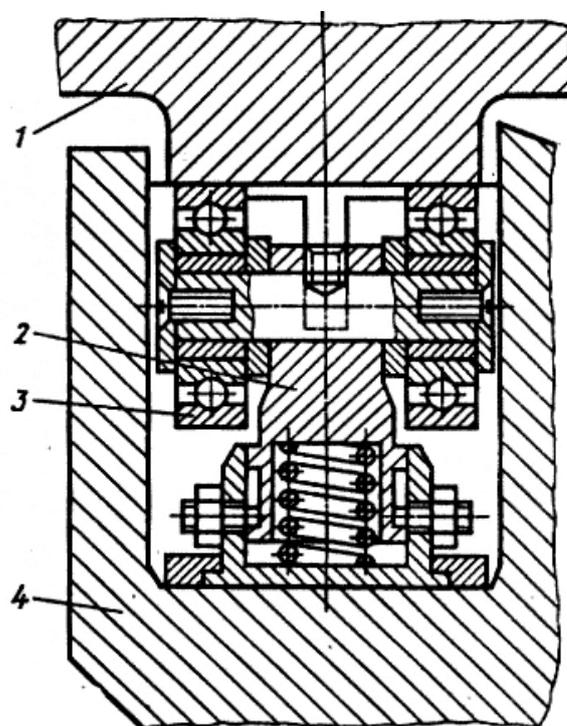
Проведем еще два примера реализации правила снижения контактных напряжений конструктивными методами.



Р и с. 5.41. Цельноалюминиевые поршни:
 а - с цилиндрической разрезной юбкой; б - с овальной юбкой
 и Т-образным разрезом; в - с овальной юбкой и П-образным разрезом



Р и с. 5.42. Разгрузочная канавка 1
 на торцевой поверхности подпятника
 шестеренного насоса (А - полость
 всасывания; Б - полость нагнетания)



Р и с. 5.43. Роликовая опора для
 разгрузки направляющих:
 1 - стол; 2 - основание; 3 - ролик; 4 - ста-
 нина станка; 5 - разгружающая пружина

Гидроразгрузка. На рис. 5.42 приведен пример разгрузки подпятника шестеренного насоса путем устройства разгрузочной канавки 1, соединяющей замкнутую полость с камерой нагнетания.

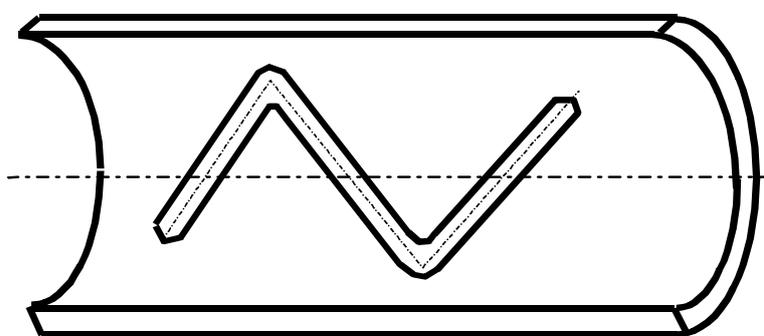
Механическая разгрузка. На рис. 5.43 приведен пример разгрузки прямолинейной роликовой направляющей¹. Величина разгрузки определяется заданной характеристикой пружины.

¹ В настоящей главе использованы примеры из книги "Триботехника" проф. Д.Н. Гаркунова.

Традиция преодоления сил трения и уменьшения изнашивания, прежде всего, связана с применением смазки. В современных машинах трение без смазки практически исключено. Конструкторские задачи организации смазки сводятся к определению и выбору типа смазочного материала (масло, пластичная смазка, твердая смазка), способа доставки смазочного материала в зону трения, устройства маслосистемы (включая очистку, термостабилизацию, насосное хозяйство, трубопроводы, форсунки для адресной подачи масла или при смазывании "масляным туманом" и суфлеры для отсоса масла на выходе из рабочей зоны).

В подшипниках качения применяют закладную смазку, рассчитанную либо на весь ресурс работы подшипника, либо на периодическую замену, как это принято при эксплуатации электродвигателей.

Важной конструкторской задачей для подшипников скольжения является устройство масляных канавок и карманов на поверхности трения. Пример одного из решений приведен на рис. 5.44.



Р и с. 5.44. Пример исполнения канавки на вкладыше подшипника скольжения

Далее будет показано благотворное воздействие на преодоление "масляного голодания" регулярных рельефов различной гравюры, тип которой выбирается исходя из особенностей работы подшипника. Так, в подшипниках гидродинамического типа устройство сетки канавок противопоказано, так как они приводят к снижению давления в смазочном клине. Здесь эффективна система не связанных между собой углублений, содержащих "резервную" смазку. Однако все решения по конструкции узлов трения принимаются после тщательных расчетов, а критерием эффективности принятых решений являются результаты испытания.

5.4.2. Основы расчетов при проектировании подшипников скольжения

Инженерные расчеты при проектировании подшипников скольжения производятся на основе теории контактной гидродинамики, основы которой кратко изложены в гл. 2. Правильное определение основных рабочих характеристик подшипников скольжения (грузоподъемности, потерь на трение и необходимого количества смазки) во многом обеспечивает надежность и долговечность проектируемого опорного узла при его эксплуатации в режиме гидродинамического трения.

Инженерные методы расчета и программное обеспечение этих расчетов позволяют применять единую методику для узлов трения различных машин, что показано в табл. 5.23. Здесь также приведены материалы подшипников, средние значения удельной нагрузки P_m на подшипник, окружная скорость v и геометрические характеристики: относительная длина λ , угол охвата Ω , относительный зазор ψ . В этих выражениях: l – длина вкладыша подшипника по образующей; d и z – диаметр и радиус шейки вала; Δ и δ – диаметральный и радиальный зазоры в подшипнике, e – относительный эксцентриситет.

Применение приведенных параметров правомерно за исключением случаев тяжело нагруженных опор ($p_m > 10$ МПа) и высокоскоростных режимов ($v > 70$ м/с). В случае тяжело нагруженных опор появляются силовые и температурные деформации. При высокоскоростных режимах в смазочном слое зарождается турбулентный характер течения. В этом случае принято считать, что режимам работы ($p_m < 10$ МПа; $v < 70$ м/с) соответствует ламинарное изотермическое течение вязкой несжимаемой жидкости в зазоре цилиндрического недеформируемого стационарно нагруженного подшипника скольжения (рис. 5.45). Для этого случая на основе уравнения Рейнольдса определяют количественные характеристики процесса и описывают распределение гидродинамических давлений в смазочном слое:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6 \mu v \frac{\partial h}{\partial \varphi}, \quad (5.14)$$

где $p(\varphi, y)$ – гидродинамическое давление; $h(\varphi)$ – толщина смазочного слоя; μ – постоянная динамической вязкости смазки; v – окружная скорость шейки вала.

При использовании уравнения (5.14) условия однозначности определения давления $p(\varphi, y)$ включают:

размерные характеристики (радиус шейки вала r_1 , радиус вкладыша r_2 , длина вкладыша L , величина зазора между шейкой вала и вкладышем $\delta = r_2 - r_1$, эксцентриситет осей шейки вала и вкладыша – e) (см. рис. 5.45);

граничные условия

$$\begin{aligned} p \Big|_{\varphi_1, y} = 0; \quad p \Big|_{\varphi_2, y} = 0; \\ p \Big|_{\varphi_1, y = \pm \frac{L}{2}} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi_2, y} = 0. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Указанные граничные условия, точно отражая физический процесс течения смазки, подтверждены теоретически и экспериментально.

Переменными параметрами задачи являются r, L, δ, e, v, μ .

Задача может быть охарактеризована как краевая с наличием свободных границ, а ее решение имеет вид

$$p = f[\varphi, y, r, e, \delta, L, v, \mu, \varphi_1, \varphi_2, (y)]. \quad (5.16)$$

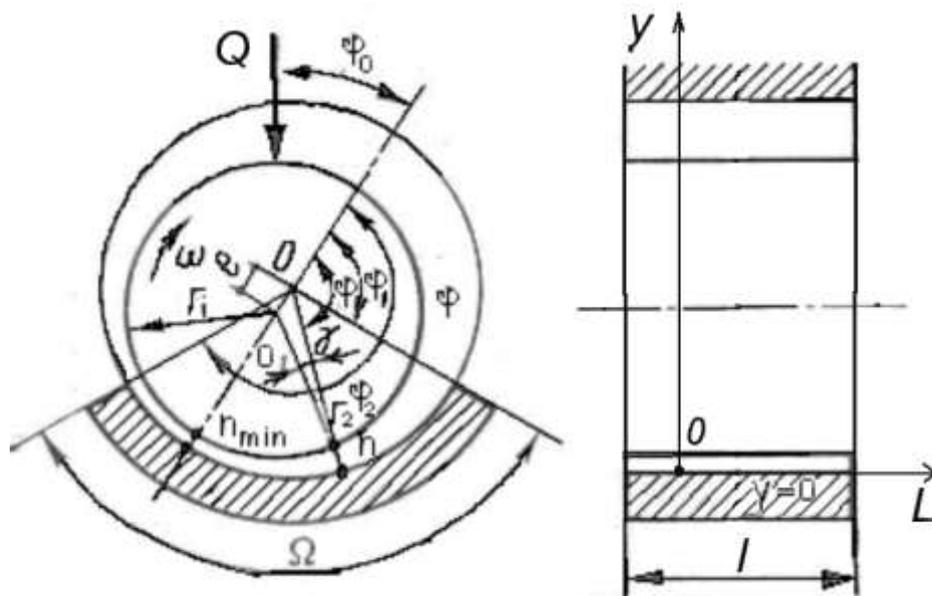
Таблица 5.23.

Характеристики подшипников скольжения для различных машин

Область применения подшипника	Материал опорной поверхности вкладыша	P_m , кгс/см ²	V , м/с	λ	Ω^* , градус	ψ
Прокатные станы, ковочные машины, прессы, манипуляторы, тяжелые металлорежущие станки, тихоходные дизели	Баббит Б88, Б83, Б16, БС6, БН, БК2 Бронза Бр. СЗО БрОФ6.5-0,15	50-200	0,5-35	0,5-1,3	150-360	0,00013-0,001
Коренные и шатунные подшипники поршневых двигателей, насосов и компрессоров	Баббит Б83, БН, БК2; Бронза Бр.СЗО	20-150	3-10	0,4-1		0,0005-0,002
Сепараторы, центрифуги, высокоскоростные двигатели внутреннего сгорания	Баббит Б88, Б83	20-100	50-100	0,3-0,7	360	0,002-0,003
Редукторы	Баббит БС6; Бронза Бр. АЖ9-4Л. Бр. АЖС7-1,5-1,5	10-40	4-10	0,8-1,2		0,0005-0,0015
Паровые турбины	Баббит Б88, Б83, БН	7-20	5-65	0,6-1,0	120-180 $\Omega_c=30\div 60$	0,0015-0,0025
Генераторы, электродвигатели центробежные насосы	Баббит Б83, Б16- БН; Бронза БрОФ6.5-0,15; БрОЦС 4-1-1; Бр.АЖ9-4Л	7-15	2-15	0,6-1,2	120-360 $\Omega_c=30\div 60$	0,001-0,002
Шпиндели металлорежущих станков	Баббит БН, Б16; Бронза БрОФ6.5-0,15, Бр.СЗО, БрОЦС 4-1-4	5-20	до 25	0,5-1,0	360 $\Omega_c=45\div 60$	0,0007-0,004
Гидротурбоагрегаты, турбокомпрессоры, турбовоздуходувки, вентиляторы, турбобуры	Баббит Б83, Б16. БСВ, БН; Бронза БрОФ6.5-0,15; Пластмассы; Резинографит	3-20	4-35	0,35-1,5	360 $\Omega_c=20\div 40$	0,0002-0,005
Трансмиссионные валы и передачи	Бронза Бр.АЖ9-4Л; БрАЖМц10- 3-1,5; Латунь ЛАЖМц 66-6-3-2; ЛМцЖ 55-3-1	1,5-15	0,5-3	0,4-1,5	120-360	0,003-0,005

Для многосегментных конструкций подшипников указан угол охвата одного сегмента Ω_c

Обозначения: $P_m=Q/dl$ - средняя нагрузка; v - окружная скорость; $\lambda=l/d$ - относительная длина; Ω - угол охвата; $\psi=\delta/r$ - относительный зазор



Р и с. 5.45. Схема подшипника

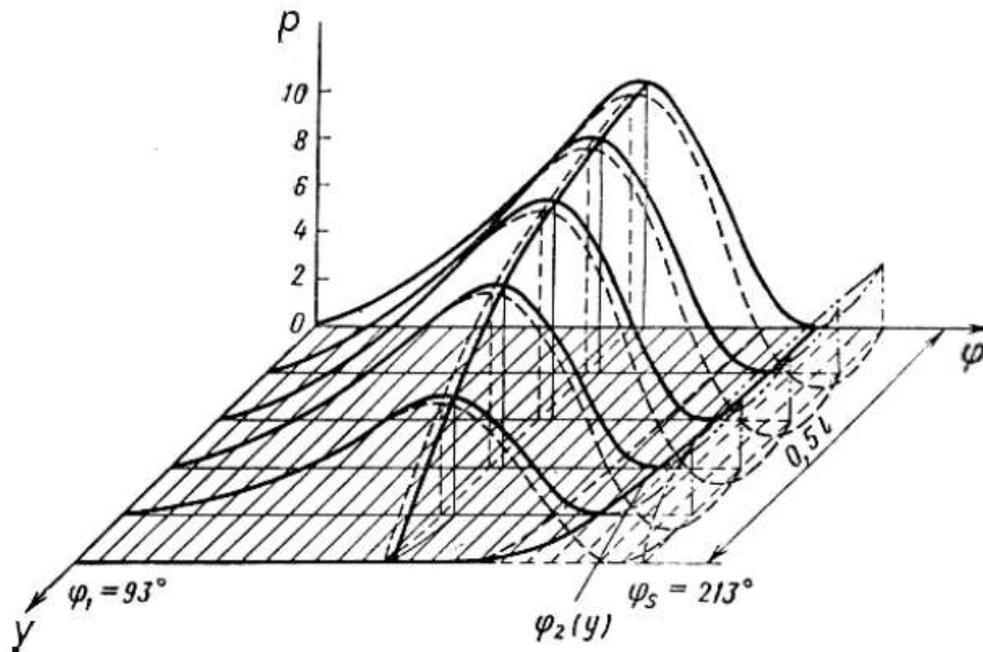
После нахождения решения (5.16) определяют интегральные характеристики подшипника в виде безразмерных коэффициентов нагружения ξ , сопротивления вращению ζ и расхода смазки q . Использование решения (5.16) и характеристик ζ , ξ и q для общих случаев нестационарного нагружения подшипника возможно при $Re Sh < 0,1$, где Re - число Рейнольдса, показывающее отношение сил инерции к силам вязкости; Sh - число Струхала, характеризующее скорость изменения процесса за время t . Течение смазки рассматривают как квазистационарное.

Изложенный метод расчета приемлем для подшипников, подверженных центробежным нагрузкам при вращении линии центров с той же угловой скоростью, что и нагрузка. Однако для общего случая динамического нагружения при произвольных по величине и направлению силах статические характеристики можно использовать только в первом приближении, например, при расчете подшипников кривошипно-шатунных механизмов. В этом случае определяют средние за цикл нагрузку и угловую скорость, по которым находят средние значения температур смазочного слоя и эксцентриситета из условия теплового баланса. Затем определяют угол колебания во времени $\phi_0(t)$ линии центров по отношению к вектору нагрузки за один цикл и изменение эксцентриситета $e(t)$. По максимальному значению эксцентриситета находят минимальную толщину смазочного слоя $h_{min}(t)$, по которой можно судить о возможности реализации жидкостного трения в подшипнике.

При проведении проектных расчетов обычно следуют установившемуся порядку.

1. Определяют поле давления в смазочном зазоре и грузоподъемность подшипника. Расчетные результаты представляют в виде эпюры давления по развертке подшипника (рис. 5.46).

В ходе этого расчета выбирают вязкость, тип смазочного масла и относительный зазор.



Р и с. 5.46. Пример распределения давления в подшипнике скольжения

2. Определяют сопротивление вращению

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial h} = \mu \frac{\omega r}{h} \pm \frac{h}{2r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \varphi}, \quad (5.17)$$

где τ - ньютоновское сопротивление сдвигу.

По итогам этих расчетов оценивают мощность, затрачиваемую на преодоление сил трения.

3. Определяют расход смазки.

Торцевой расход (утечка)

$$Q_T = 0,5\Psi \omega l d^2 q, \quad (5.18)$$

где Ψ - относительный зазор; ω - частота вращения; l и d длина и диаметр подшипника; $q = \Sigma q_{1и2}$ - расходы из нагруженной и ненагруженной зон по торцу подшипника.

Расход через осевые смазочные канавки:

$$Q = \Sigma Q_{1,2,3}, \quad (5.19)$$

где $Q_{1,2,3}$ - расходы в нагруженной, ненагруженной зонах через осевые канавки.

4. С учетом п.3 определяют минимальную толщину смазочного слоя

$$\begin{aligned} h &= 0,5\Delta(1+\chi\cos\varphi), \\ h_{\min} &= 0,5\Delta(1-\chi). \end{aligned} \quad (5.20)$$

Жидкостной режим трения обеспечивается при условии

$$h_{\min} \geq 1,1 h_{кр}, \quad (5.21)$$

где $h_{кр} = Rz' + Rz'' + Y_0$; Rz' и Rz'' – соответственно параметры шероховатостей вала и подшипника; Y_0 – прогиб шейки вала.

5. Определяют среднюю температуру смазочного слоя

Вначале определяют количество тепла, ккал/с, генерируемого трением по упрощенной схеме:

$$A_{\square p} = \frac{M\omega}{427} = \frac{f'pv}{427}. \quad (5.22)$$

Затем определяют количество тепла, отводимого смазкой – A_Q и тепло отдаваемое через элементы конструкции, A_D .

Средняя температура смазочного слоя определяется из уравнения теплового баланса

$$A_F = A_Q + A_D, \quad (5.23)$$

Полученные оценки используют при проектировании подшипников, а для обеспечения надежности головные образцы или макеты подшипников подвергают тщательной проверке и испытаниям.

5.4.3. Инженерные расчеты при использовании подшипников качения

Классификация подшипников качения

Подшипники качения классифицируются по следующим признакам (табл. 5.24): направлению воспринимаемой нагрузки относительно оси вала (радиальные, радиально-упорные, упорные); форме тел качения (шариковые, роликовые); числу рядов тел качения (однорядные, двухрядные, четырехрядные, многорядные); способности самоустановки (самоустанавливающиеся и несамоустанавливающиеся).

Соотношение габаритных размеров подшипников определяет их серию: сверхлегкую, особо легкую, легкую, легкую широкую, среднюю, среднюю широкую и тяжелую. Выпускают преимущественно подшипники легкой и средней серии.

Наряду со стандартными изготавливают особые конструкции, использование которых в каждом конкретном случае требует специального обоснования.

Эксплуатационные характеристики, система условных обозначений, основные типоразмеры, посадки, уплотнения, смазки, монтаж, уход за подшипниками качения строго регламентированы российскими и зарубежными стандартами и содержатся в справочной литературе.

Расчет подшипников качения при статическом нагружении

Статическая грузоподъемность подшипника определяется как статическая радиальная нагрузка, которой соответствует общая остаточная деформация тела ка-

Классификация подшипников качения по ГОСТ 3395-75

Радиальные		Радиально-упорные		Упорные и упорно-радиальные	
Шари- ковые	Роли- ковые	Шари- ковые	Роли- ковые	Шари- ковые	Роли- ковые
Однорядные: основной конст- рукции; со стопорной канавкой на на- ружном кольце; с упорным бор- том; с фланцем на наружном кольце; с защитными шайбами; с уплотнениями; сферические. Двухрядные сферические	С короткими ци- линдрическими ро- ликами: однорядные; двухрядные. Однорядные сфе- рические. Двухрядные сфе- рические: основной конст- рукции; с защитными шай- бами; С игольчатыми ро- ликами: однорядные; комбинированные.	Одноряд- ные: основной конст- рукции; с разъем- ными коль- цами с трех- и че- тырех-точе- чным кон- тактом; сдвоен- ные. Двухряд- ные.	С кониче- скими роли- ками: однорядные основной кон- струкции; с упорным бортом на на- ружном коль- це. С кониче- скими роли- ками: двухрядные; четыре- рядные.	Упор- ные: однар- ные; двой- ные. Упор- но-ради- альные с углом контакта 60°.	Упор- ные: с ци- линдри- ческими ролика- ми; с кони- ческими ролика- ми. Упор- но-ради- альные сфериче- ские.

чения и колец в наиболее нагруженной зоне контакта, равная 0,0001 диаметра те-
ла качения.

В однорядных радиально-упорных подшипниках статическую грузоподъем-
ность рассчитывают по радиальной составляющей нагрузки, вызывающей ради-
альное смещение колец подшипника относительно друг друга.

Для подшипников, которые работают при медленном вращении ($n < 1$ об/мин),
а также в режиме качательного движения, допустимая нагрузка определяется не
усталостью материала, а остаточной деформацией на контактирующих рабочих
поверхностях. Необходимо, чтобы величина действующей на подшипник нагруз-
ки не превышала допустимую статическую грузоподъемность (C_0). В этом случае
остаточная деформация мала и не снижает работоспособности подшипника. Рас-
чет неподвижного или медленно вращающегося ($n < 1$ об/мин) подшипника произ-
водят по статической грузоподъемности C_0 . Если статическая нагрузка состоит из
радиальной и осевой составляющих, то определяется эквивалентная статическая
нагрузка. Эквивалентная нагрузка вызывает у подшипников такие же остаточные
деформации, как и при действительных условиях нагружения. Эквивалентная ста-
тическая нагрузка:

на радиально-упорные шарикоподшипники

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a, \quad (5.24)$$

на упорно и упорно-радиальные шариковые и роликовые подшипники

$$P_0 = F_a + 2,3F_r \operatorname{tg}\alpha, \quad (5.25)$$

где F_r - наибольшая радиальная составляющая статической нагрузки, Н; F_a - наибольшая осевая составляющая статической нагрузки, Н; X_0 - коэффициент радиальной статической нагрузки; Y_0 - коэффициент осевой статической нагрузки. Коэффициенты радиальной и осевой статических нагрузок можно взять из табл. 5.25.

Таблица 5.25.

Значения коэффициентов радиальной и осевой нагрузок

Тип подшипника	Однорядные		Двухрядные	
	X_0	Y_0	X_0	Y_0
Шариковый радиальный и радиально-упорный при $\alpha, ^\circ$:				
0 – 12	0,6	0,50	0,6	0,50
18 – 19	0,5	0,43	1,0	0,86
20	0,5	0,42	1,0	0,84
Шариковый радиально-упорный при $\alpha, ^\circ$:				
25	0,5	0,38	1,0	0,76
26	0,5	0,37	1,0	0,74
30	0,5	0,33	1,0	0,66
35	0,5	0,29	1,0	0,58
36	0,5	0,28	1,0	0,56
40	0,5	0,26	1,0	0,52
Роликовый радиально-упорный, шариковый сферический	0,5	$0,22 \operatorname{ctg} \alpha$	1,0	$0,44 \operatorname{ctg} \alpha$

Далее производят проверку, не будет ли P_0 меньше, чем F_r ; если $P_0 < F_r$, то для расчета принимают $P_0 = F_r$.

У подшипников, работающих при резкопеременной нагрузке, при вращательном движении ($n > 10$ об/мин) следует проверять статическую грузоподъемность. Значительные перегрузки могут вызвать неоднородную остаточную деформацию, которая приводит к нарушению плавности хода подшипника.

У подшипников, которые работают при малых числах оборотов и рассчитаны на небольшой срок службы, необходимо также проверять статическую грузоподъемность. Но в этих условиях рассчитанная по формуле долговечности допустимая нагрузка может превышать статическую грузоподъемность.

Для подшипников, работающих в режиме качательного движения, могут быть допущены большие нагрузки, чем статическая грузоподъемность подшипника. В этом случае остаточные деформации колец и тел качения могут превосходить допустимые для подшипника, эксплуатирующегося при вращательном движении.

Шарнирные подшипники подвижных соединений, эксплуатируемые в режиме качательного движения, наряду с радиальными нагрузками могут воспринимать

небольшие осевые усилия. Приведенная радиальная нагрузка, эквивалентная одновременному действию радиальной и осевой нагрузок,

$$Q = F_r + 6F_a, \quad (5.26)$$

Допускаемые радиальные нагрузки для шарнирных подшипников типов Ш, ШС обычно даются для 5000 повторных нагружений. При большом числе нагружений указанные нагрузки должны быть снижены с учетом понижающего коэффициента К, значения которого приведены ниже.

Число повторных нагружений -	5000	10000	50000	100000
К	- 1	0,66	0,24	0,1750

Шарнирные подшипники для неподвижных соединений эксплуатируются в условиях периодических единичных сдвигов одного кольца относительно другого.

Нагрузки на тела качения

Нагрузки на тела качения действуют неравномерно. Наиболее нагруженным является тело качения, расположенное в радиальном подшипнике в месте приложения вектора результирующей нагрузки. Равномерное нагружение возможно лишь при симметричной (безмоментной) чисто осевой нагрузке в упорном подшипнике:

$$P_0 = F_a/0,8z, \quad (5.27)$$

где коэффициент 0,8 учитывает возможные перекосы и неравномерность нагружения, z – число тел качения.

Для шарикоподшипников радиальных однорядных при радиальном нагружении, при зазорах средней величины нагрузка на наиболее нагруженное тело качения

$$P_0 = 5F_r/z \quad (5.28)$$

Для радиальных сферических двухрядных шарико- и роликоподшипников

$$P'_0 = 5F_r/2z \cos \alpha \quad (5.29)$$

Для роликоподшипников радиальных с короткими цилиндрическими роликами и конических

$$P'_0 = 4,6F_r/z \cos \alpha \quad (5.30)$$

Для беззазорных радиально-упорных шарикоподшипников при номинальном угле контакта α

$$P'_0 = 4,37 F_r/z \cos \alpha \quad (5.31)$$

При комбинированном действии нагрузок F_r и F_a в условиях статического приложения для однорядных радиальных, радиально-упорных шариковых и ко-

нических подшипников осевая нагрузка F_a не влияет на нагрузку на одно тело качения до тех пор, пока F_a/F_r не превысит некоторой принятой величины e , составляющей порядка 1/3.

Оценка предельной быстроходности подшипников качения

Для стандартных подшипников обычно указывают значения предельных частот вращения. Под предельной частотой вращения понимают такую частоту вращения, при превышении которой не обеспечивается номинальная долговечность (расчетный срок службы) подшипника. Максимальная допустимая частота вращения для каждого типоразмера подшипника зависит в первую очередь от нагрузки, способа смазки, условий охлаждения, конструкции и материала сепаратора.

Предельная частота вращения, об/мин, может быть ориентировочно определена по формуле

$$n = d_{m,n}/d_m, \quad (5.32)$$

где $d_{m,n}$ - скоростной параметр, значения которого приведены в табл. 5.26; d_m - диаметр окружности, проходящей через центры тел качения, K - коэффициент, учитывающий снижение долговечности при предельной частоте вращения $K = 0,3 \div 1,0$.

Таблица 5.26.

Значения скоростного параметра $d_{m,n}$ для различных типов подшипников

Тип подшипника	Скоростной параметр ($d_{m,n}$) 10^{-5} , для смазочного материала	
	пластичного	жидкого
Шариковый (радиальный и радиально-упорный однорядный, радиальный сферический двухрядный)	4 - 4,5	5,5 - 6,0
Роликовый: радиальный с короткими цилиндрическими роликами	3,5 - 4	4 4,5
конический однорядный	2,5	3,0
конический двухрядный	2,0	3,0

При использовании подшипников с большой нагрузкой верхний предел частоты вращения должен быть снижен. Предельную частоту вращения необходимо снизить и у сферических роликоподшипников, воспринимающих комбинированную нагрузку, когда осевая нагрузка высока ($F_a/F_r \geq 0,6$). В этом случае n должно быть умножено на коэффициент 0,8.

При использовании подшипников с массивным точеным сепаратором из цветного металла или полимерных материалов в сочетании с улучшенными условиями смазки и охлаждения предельные частоты вращения могут быть увеличены.

Для шарикоподшипников радиальных и радиально-упорных однорядных предельная частота вращения может быть увеличена - в 2,5 - 3 раза, для цилиндрического роликоподшипника - в 2 - 2,2 раза.

Расчет потерь на трение в подшипниках качения

При вращении деталей подшипников качения в местах контактов всегда возникают трение качения и трение скольжения. Каждая составляющая потерь на трение сложным образом зависит от условий эксплуатации (частоты вращения, нагрузки, температурного режима и смазки) и конструктивного исполнения, определяющего контактные взаимодействия. Поэтому точный расчет составляющих можно выполнить при условии накопления достаточного экспериментального материала.

На практике потери на трение в подшипниках качения характеризуются моментом трения $M_{тр}$, эквивалентным моменту вращения при данных эксплуатационных условиях (трение качения, скольжения, а также трение в смазочном слое). Момент трения в подшипниках зависит от многих фактов и прежде всего от нагрузки, частоты вращения, смазки, конструктивных особенностей, класса точности подшипника и др. При рекомендуемых условиях эксплуатации, когда результирующая нагрузка не превышает 10 - 20 % динамической грузоподъемности C , момент трения может быть ориентировочно определен по формуле

$$M_{np} = \mu_{тр} Qd/2, \quad (5.33)$$

где μ_{np} - приведенный коэффициент трения; Q - результирующая нагрузка на подшипник ($P = \sqrt{F_r^2 + F_a^2}$); d - диаметр отверстия в подшипнике. С учетом типа подшипника и условий эксплуатации приведенный коэффициент трения может принимать значения $\mu_{np} \cong 0,001 \div 0,020$.

На основе экспериментальных данных для приближенных расчетов можно принять следующие средние величины приведенного коэффициента трения для подшипников, эксплуатирующихся при нормальных режимах работы и пластичном смазочном материале:

Шарикоподшипники:

радиальные однорядные	- 0,002;
сферические двухрядные	- 0,0015;
радиально-упорные	- 0,003;
упорные	- 0,003.

Роликоподшипники:

с короткими цилиндрическими роликами	- 0,002;
с длинными цилиндрическими роликами	- 0,004;
двухрядные сферические с бочкообразными роликами	- 0,004;

игольчатые - 0,008;
 конические - 0,008.

Следует отметить, что трение, вызываемое наличием контактов скольжения уплотнений, может превысить величину трения в самом подшипнике без уплотнений при одинаковых условиях эксплуатации.

Мощность, Вт, расходуемая на трение в подшипнике,

$$N_{тр} = 1,047 \cdot 10^{-3} M_{тр} n, \quad (5.34)$$

где $M_{тр}$ - момент трения, Н·см; n - частота вращения, об/мин.

Гидродинамический режим смазки подшипника качения

Работоспособность подшипника зависит не только от нагрузки и частоты вращения, но и от относительной толщины смазочной пленки.

Рекомендуется производить проверку параметра режима смазки Λ для подшипников по формуле

$$\Lambda = k_0 \frac{0,176}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} d_m^{0,55} d_{mn}^{0,75} \gamma Q_0^{-0,15}, \quad (5.35)$$

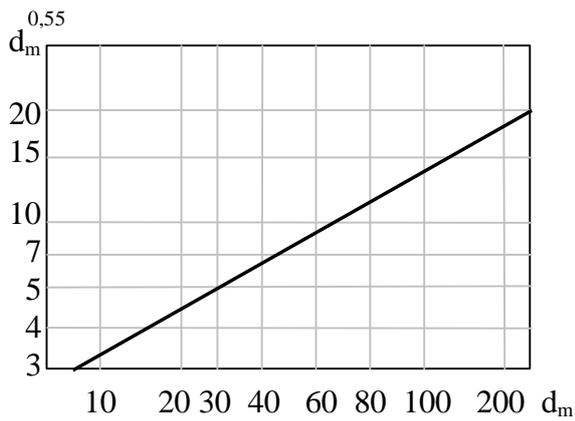
где K_0 - конструктивный коэффициент, зависящий от типа подшипника (табл. 5.27); R_{a1} и R_{a2} - средние арифметические значения параметров шероховатости трущихся поверхностей, мкм, зависящие от типа и класса точности подшипника; $d_m^{0,55}$ - определяется по рис. 5.47; n - частота вращения внутреннего кольца подшипника, об/мин; $(d_{mn})^{0,75}$ - определяется по рис. 5.48; $\gamma = \mu^{0,75} \alpha^{0,6}$ - параметр масла, определяемый по рис. 5.49 в зависимости от температуры подшипника; Q_0 - эквивалентная статическая нагрузка, Н.

Рекомендуется выбирать $\Lambda \geq 3$. Этот параметр пригоден в первую очередь для оценки влияния минеральных и синтетических масел на работоспособность подшипников качения. При использовании пластичных смазочных материалов параметр Λ частично пригоден для оценки вязкости того масла, на базе которого изготавливается соответствующий пластичный смазочный материал.

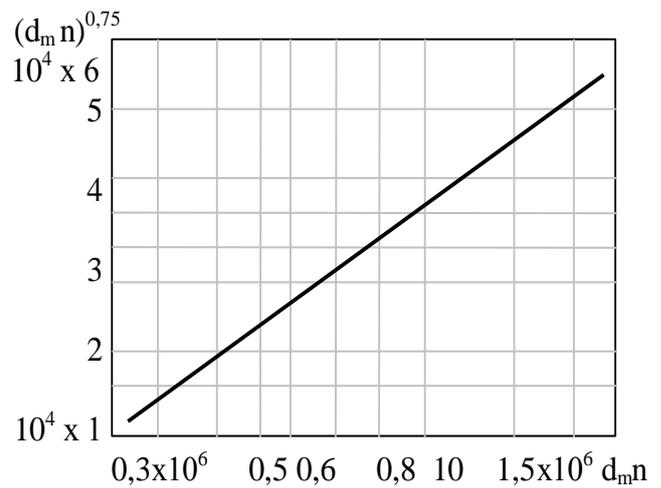
Таблица 5.27.

Значение конструктивного коэффициента K_0

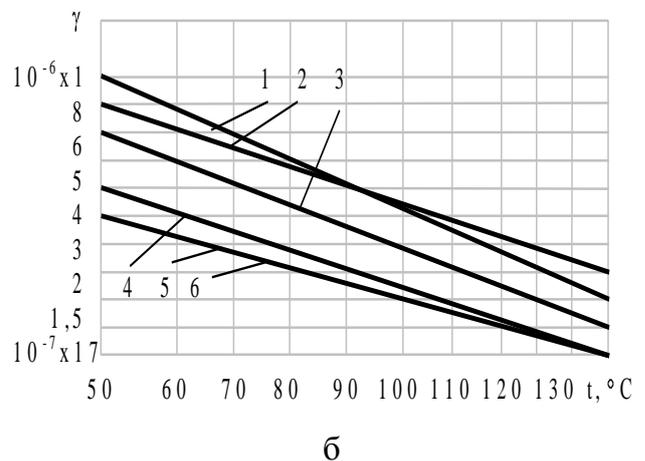
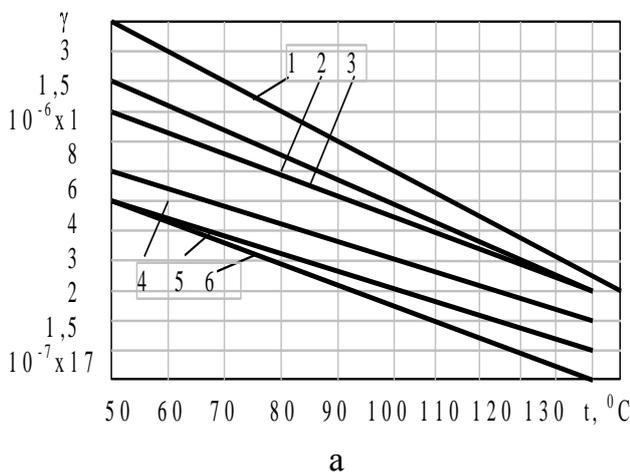
Тип подшипника	Коэффициент K_0
Шарикоподшипник:	
радиальный однорядный, сферический двухрядный	70
Радиально-упорный однорядный (всех серий)	75
$\alpha = 12 \div 36^\circ$	
Роликоподшипник радиальный с короткими цилиндрическими роликами, роликоподшипник конический	100



Р и с. 5.47. График для определения $d_m^{0,55}$ по величине d_m , мм



Р и с. 5.48. График для определения $(d_m n)^{0,75}$ по величине $d_m n$



Р и с. 5.49. Зависимость параметр масла ν от его рабочей температуры t :

а – для основных масел: (1 - МС-20; 2-75% МС-20+25% трансформированного; 3 - 50% МС-20+50% трансформированного; 4 - 25% МС-20+75% трансформированного; 5 - веретенное-2; 6 - МК-8 трансформированное); б - для авиационных масел (1 - МН-7,5; 2 - ВНИИ НП-7; 3 - Б-3В; 4 - ЛЗ-240; 5 и 6 - КУА 36/1 и ВНИИ НП 50-1-49)

5.4.4. Основные принципы конструирования подшипниковых узлов

Если конструктор на основании расчета правильно выбрал необходимый типоразмер подшипника качения для узла трения с учетом требований долговечности, теплоотвода и способа смазки, то перед ним возникает новая задача - правильно сконструировать подшипниковый узел. Для широкого диапазона габаритных размеров, нагрузок и скоростей механизмов транспортных машин можно выделить следующий комплекс общих требований, которым должен удовлетворять любой подшипниковый узел для обеспечения надежной работы установленных в нем опор качения.

1. Конструктивное и технологическое обеспечение соосности посадочных мест подшипников каждого из валов, достигаемое, как правило, расточкой, а если возможно, шлифовкой на проход двух или нескольких гнезд под подшипники для каждого вала.

2. Возможное снижение числа стыков в элементах узла, например, использование стаканов и переходных втулок, в которых вмонтированы подшипники, лишь в тех случаях, когда конструктивное решение без них было бы невозможным. Таким образом улучшаются соосность и отвод тепла от подшипника.

3. Обеспечение удобства монтажа-демонтажа подшипников и узла в целом.

4. Выбор посадок внутренних колец на вал и наружных колец в корпус с обеспечением жесткой связи за счет посадочного натяга для того кольца, которое вращается вместе с валом или корпусом. При этом посадки с большими натягами допустимы лишь при очень больших и особенно при ударных нагрузках.

В малогабаритных приборах оптимальными являются натяги 0 - 3 мкм. Для невращающихся колец натяг заменяется небольшим зазором. В приборах зазоры равны 2 - 5 мкм, иногда они несколько больше.

5. При сравнительно длинных валах $l = (10 \div 12)d$ монтаж одной из опор с фиксацией в осевом направлении, а остальные "плавающие", т.е. без осевой фиксации. "Плавающий" подшипник, жестко фиксированный своим вращающимся кольцом, должен иметь посадку для второго кольца, позволяющую ему с малым сопротивлением перемещаться при тепловых деформациях вала или корпуса. Фиксируется, как правило, более нагруженный подшипник, на который передаются возможные двусторонние осевые усилия, что должно быть учтено при его выборе. Легко нагруженная опора, естественно, легче "плавает" в осевом направлении.

6. В узлах с радиально-упорными подшипниками (несдвоенного типа и немногоконтактными) обычно фиксируются односторонне оба подшипника, причем предпочтителен заранее рассчитанный натяг, осуществляемый пружинами или жесткими крышками с прокладками. При отсутствии особых требований к точности и жесткости узла допустима регулировка осевой игры парного комплекта подшипников в узких пределах.

7. Если перекос вала вследствие смещения осей гнезд под подшипники превосходит 15 - 20', лучше использовать самоустанавливающиеся (сферические) подшипники. В этом случае схема установки с фиксированной опорой обязательна.

8. Отклонения от перпендикулярности заплечников вала и корпуса относительно оси вращения должны быть минимальны. В зависимости от точности узла они находятся в пределах 2 - 20 мкм, причем для крупных подшипников допустимы несколько большие отклонения.

9. Исключение (по возможности) регулировки осевого смещения подшипников резьбовыми деталями, так как даже при мелкой резьбе, определенный перекос упорного торца неизбежен.

10. Использование упорных подшипников на горизонтальных валах, несмотря на их повышенную осевую жесткость, нежелательно, а при повышенных частотах

вращения вообще недопустимо из-за возникновения возможности смещения комплекта шариков с сепаратором относительно колец при разгрузке подшипника, а также вследствие гироскопических эффектов и нагружения краев колец центробежными силами шариков. В этом случае используются упорно-радиальные или радиально-упорные подшипники.

11. Осевое крепление концевых подшипников на валах обязательно при значительных и особенно при ударных нагрузках. Легкие приборные подшипники, как правило, не требуют осевого крепления при наличии правильно выбранных посадок. При этом осевая фиксация должна обеспечиваться крышкой или заплечником корпуса.

12. Установка радиально-упорных подшипников враспор с фиксацией и регулировкой торцевыми крышками допустима при длине валов $L \leq (10 \div 12) d$. При большей длине валов лучше устанавливать сдвоенный радиально-упорный шарико- или роликоподшипник и прочие опоры выполнять "плавающими".

13. При вращающихся наружных кольцах и установке двух радиально-упорных подшипников на оси неизбежна регулировка гайкой, навинчивающейся на резьбовой хвостовик этой оси. Гайка и хвостовик должны иметь мелкую резьбу и надежный замок против саморазвинчивания.

14. Для осевой фиксации подшипников допустимо использование пружинных колец, вставляемых в проточки на валу или в корпусе. При больших осевых усилиях установка стопорных колец недопустима.

15. Безбортовые кольца плавающих роликоподшипников с короткими цилиндрическими роликами должны иметь двустороннюю фиксацию, поскольку "плавание" обеспечивается небольшим осевым смещением роликов по неподвижной (в осевом направлении) дорожке качения безбортового кольца.

16. Пластичные смазочные материалы должны закладываться в корпуса в объемах не более $1/3$ свободного пространства, не занятого подшипником.

17. Жидкие масла заливаются в корпус до уровня центра тела качения, расположенного в подшипнике ниже всех других тел качения.

18. При фитильном смазывании рекомендуется, чтобы фитиль упирался в маслоподъемный корпус, примыкающий к внутреннему кольцу подшипника на уровне зазора плавания сепаратора.

19. При вращающихся уплотнениях и маслоотбойных шайбах необходимы гарантированные зазоры их относительно корпусных гнезд в пределах $0,3 \div 1,5$ мм (в зависимости от точности изготовления и сборки узла).

Эффективность приведенных выше конструкторских приемов подтверждена как отечественной, так и зарубежной практикой.

5.4.5. Новое направление в обеспечении надежности и высокого ресурса опор роторных систем - магнитный подвес

Как известно, в машинах и исполнительных механизмах для опор роторов, как правило, используются либо подшипники качения, либо гидродинамические подшипники жидкостного трения. Каждое из этих решений имеет свои преиму-

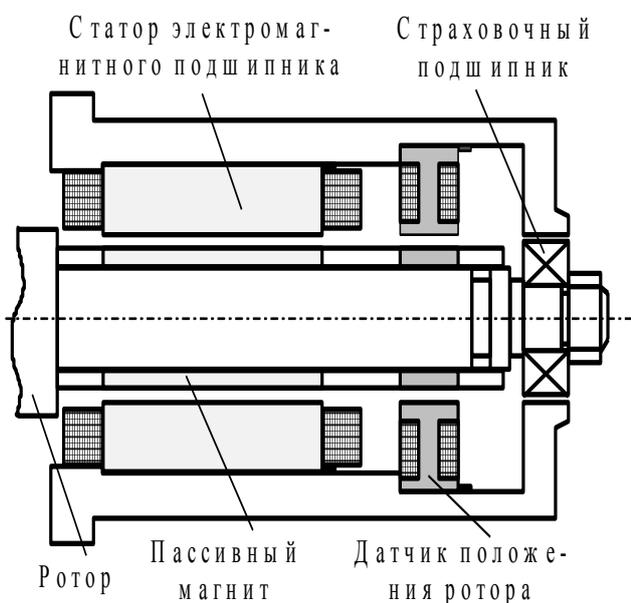
щества, недостатки и область рационального применения. Однако ни одно из них не обеспечивает желаемых высоких характеристик надежности, безопасности и ресурса по КПД (потери на трение). Все они имеют ограничения по скорости вращения, нагрузкам, тепловым напряжениям, виброхарактеристикам и т.п.

Альтернативным решением для подшипников качения и скольжения является "магнитный подвес", когда ротор поддерживается в рабочем зазоре пндермоторными силами электромагнитной системы.

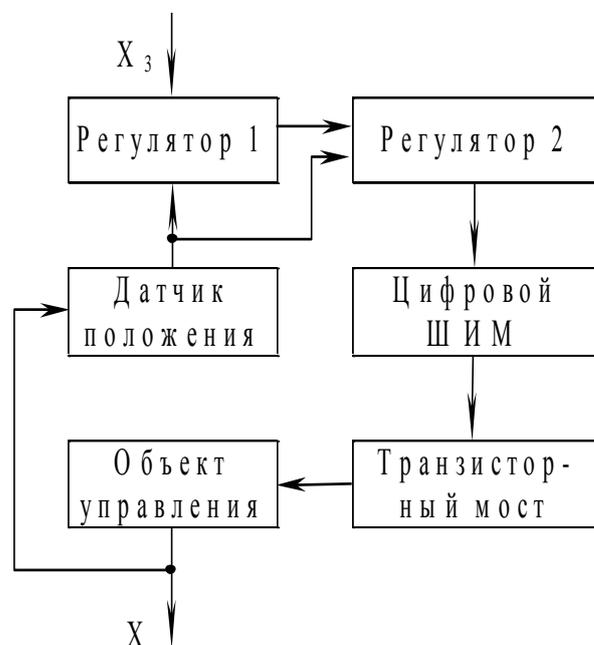
Приведем преимущества подобного конструктивного решения:

- отсутствие момента сухого трения;
- исключение маслосистемы;
- возможность достижения высоких скоростей вращения;
- управляемость характеристик жесткости и демпфирования;
- снижение уровня вибраций;
- возможность подавления резонансных явлений;
- высокая долговечность;
- снижение затрат на эксплуатацию, обслуживание и ремонт;
- возможность работы в вакууме и агрессивных средах.

Конструктивно, радиальный электромагнитный подшипник (рис. 5.50) состоит из статора, представляющего собой композицию электромагнитов, расположенных в корпусе подшипникового узла; пассивного магнита, закрепленного на роторе; датчика положения ротора; страховочного подшипника. Ротор подвешивается в магнитном поле с помощью следящей системы, которая по сигналам датчика регулирует напряжение на катушках электромагнитов и удерживает ротор в центральном положении.



Р и с. 5.50. Конструкция радиального электромагнитного подшипника



Р и с. 5.51. Функциональная схема системы управления электромагнитным подшипником

Наличие мощных силовых полупроводниковых приборов в современных условиях делает возможным создание надежных регулируемых источников питания для электромагнитных подшипников с высокой грузоподъемностью. Развитие средств цифровой микропроцессорной техники позволяет реализовать быстродействующие и точные системы стабилизации положения ротора.

Существующие отечественные образцы электромагнитных подшипников (разработка ВНИИЭМ, г. Москва) снабжены системами управления, выполненными на аналоговых элементах с применением целого ряда датчиков обратной связи (тока, ускорения и положения). Такие системы громоздки, неудобны в наладке, обладают минимумом диагностических возможностей и требуют специальной подготовки обслуживающего персонала. Иногда подход к технической реализации электромагнитной подвески роторов заключается в создании системы прямого цифрового управления электромагнитами подшипника. Функциональная схема одного канала управления электромагнитным подшипником представлена на рис. 5.51.

Здесь под объектом управления понимается процесс перемещения ротора в магнитном поле электромагнитов, управляемых напряжением силового транзисторного преобразователя. Датчик положения ротора имеет цифровой выходной сигнал, который подается на инверсные входы двух последовательно включенных цифровых регуляторов.

Регуляторы выполняются программно на однокристальной ЭВМ или программируемом контроллере. Для управления силовыми ключами транзисторного моста служит цифровой широтно-импульсный модулятор (ШИМ).

Такой подход к построению системы управления электромагнитными подшипниками разработан в НИИ ПНМС при Самарском техническом университете и отличается, во-первых, простотой технической реализации прямого цифрового управления. Во-вторых, структура системы, известная в технике следящих электроприводов как структурно-минимальный электропривод, позволяет получить высокое быстродействие при обработке внешних возмущений, абсолютную статическую точность и активное демпфирование вибраций. В-третьих, цифровая реализация регуляторов дает возможность все настроечные операции производить с внешнего пульта управления или (при соответствующей доработке) автоматизировать процесс настройки. И, наконец, предлагаемые системы прямого цифрового управления электромагнитными подшипниками могут быть выполнены миниатюрно на однокристальных контроллерах, специализированных больших интегральных микросхемах и относительно дешево.

Разработанная методика синтеза предлагаемых цифровых систем управления в совокупности со специализированным программным обеспечением позволяет реализовать точный параметрический синтез регуляторов при существенных колебательных свойствах объекта управления. В настоящее время такой подход применен к разработке и проектированию магнитных подшипников автомобильных и тракторных генераторов.

Замена подшипников скольжения на электромагнитные позволит резко увеличить срок службы и надежность электрической машины за счет устранения износа вращающихся деталей, упростит их эксплуатацию и обслуживание.

В проекте предполагается, что ротор электрической машины будет подвешиваться в магнитном поле при давлении пондермоторных сил

$$\bar{P} = \mu \cdot \bar{H} \cdot \bar{H} \cdot \bar{n} = \frac{1}{2} \mu \cdot H^2 \cdot \bar{n}, \quad (5.36)$$

где \bar{H} - вектор магнитного поля; \bar{n} - нормаль к поверхности ротора; μ - магнитная проницаемость воздуха.

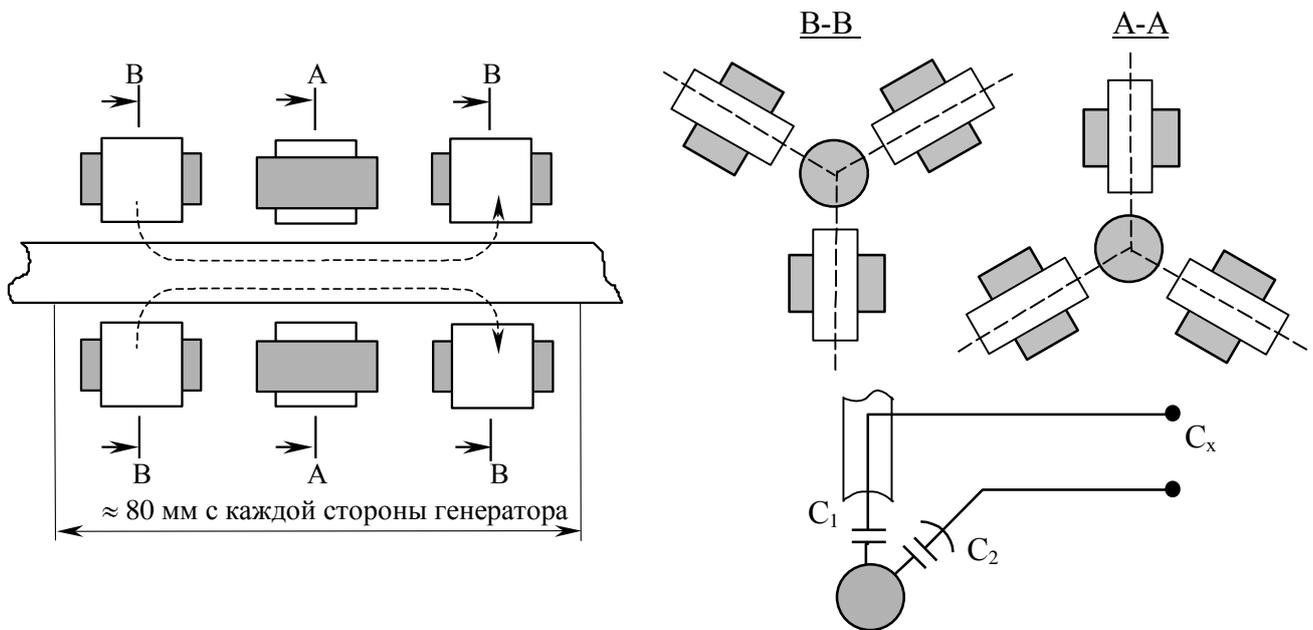
Магнитное поле создается катушкой, размещенной на статоре (см. рис. 5.50), поэтому направление поля близко к нормали и давление пондермоторных сил приводит к притяжению ротора к якорю. Поскольку подвеска ротора в стационарном поле магнитов в течение продолжительного времени невозможна, требуется наличие следящей системы, с помощью которой компенсируются отклонения ротора от теоретической оси вращения за счет обмена импульсом между ротором и полем. Время компенсации перемещения из закона сохранения количества движения равно:

$$\Delta t = \frac{r}{H} \sqrt{\frac{2\gamma \cdot l \cdot \Delta h}{\mu \cdot S}} \pi, \quad (5.37)$$

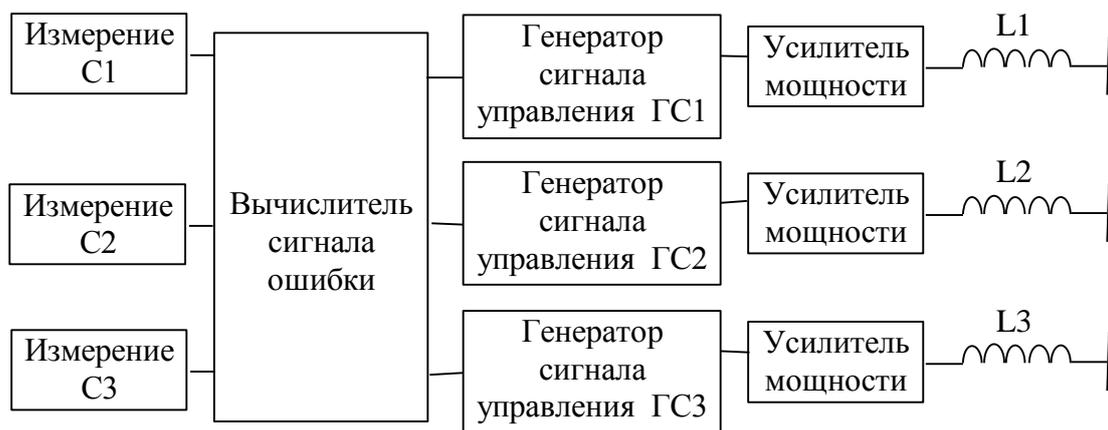
где γ - плотность материала ротора; r - радиус ротора; Δh - допустимое перемещение ротора; S - площадь полюсных наконечников; l - длина подшипника.

Проведенный анализ показал, что подвеска роторов наибольших размеров потребует использования малоинерционных устройств управления магнитным полем. В связи с этим электромагнитный подшипник предлагается реализовать с использованием трех секций, размещенных вдоль ротора (рис. 5.52), и применением в системе управления бесконтактных емкостных датчиков (рис. 5.53). При отклонении ротора будет изменяться зазор между ротором и датчиком, что сформирует измерительный сигнал. Результаты измерения (см. рис. 5.49) поступают в вычислительное устройство, вырабатывающее команды управления. Силовые управляющие катушки по управляющему сигналу возвратят ротор на прежнее место. Расчеты стального ротора с размером вала в зоне магнитного поля около 80 мм показали, что при отклонении ротора на 100 мкм время реакции Δt составляет около 1 мс. Требуемая напряженность магнитного поля около 100 кА/м. Указанные величины вполне реализуемы.

Расчеты показали, что механические воздействия на автомобильный транспорт (удары с верхней границей чистоты 120 Гц) не способны дестабилизировать следующую систему (минимальное время воздействия около 16 мкс много больше времени реакции следящей системы). Таким образом применение электромагнитных подшипников позволит не только увеличить срок службы автомобильных электрических машин, но и значительно снизить их чувствительность к ударам и вибрациям, что также повысит качество электрических параметров.



Р и с. 5.52. Схема компоновки магнитного подвеса ротора автомобильного генератора



Р и с. 5.53. Схема управления магнитным подвесом генератора

5.4.6. Оценка долговечности узлов трения методами теории вероятности

Долговечность узла трения - это время работы с заданной надежностью. Надежность выражается, как вероятность безотказной работы:

$$P = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (5.38)$$

где t - время работы; $\lambda = 1/t_0$ - интенсивность отказов; t_0 - средняя продолжительность безотказной работы (средний промежуток времени между двумя отказами).

Из рис. 5.54 видно, что чем выше интенсивность отказов, тем меньше долговечность при заданном уровне надежности ($D_2 < D_1$).

При работе сложных систем, состоящих из множества элементов (узлов), к которым относятся автотранспортные средства, надежность системы

$$P = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (5.39)$$

где p_i - надежность i -того узла; n - число узлов. Чем сложнее система, тем ниже ее надежность.

Основным путем повышения надежности узлов трения является повышение износостойкости. Ограничением является стоимость мероприятий по повышению износостойкости, что мотивирует выбор общего ресурса автомобиля.

У легковых автомобилей принят ресурс в размере 5, у грузовых - 10 лет при уровне надежности порядка 0,9. Часто долговечность выражают в виде пробега в тысячах километров, подразумевая, что за этой дистанцией скрывается время безаварийного движения с некоторой средней скоростью, например в 60 км/ч. По величине этой дистанции в первом приближении и можно судить о качестве автотранспортного средства.

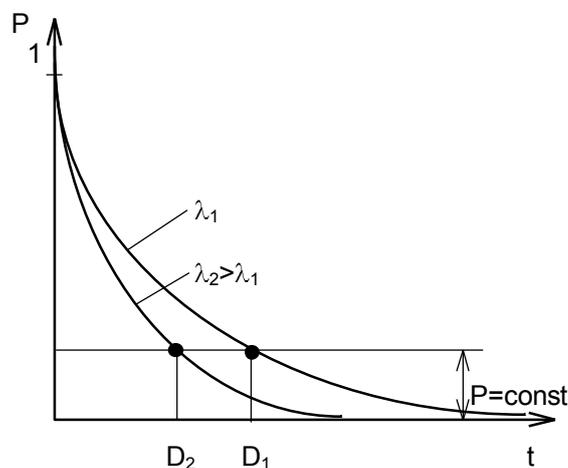
Вероятность безотказной работы узла трения (и любого другого механизма) означает, что в пределах заданного промежутка времени эксплуатации отказ невозможен. Он наступает в результате достижения предельного износа и проявляется, например, в поломке зубьев шестерен; заклинивании деталей газораспределительного механизма; проскакивании цепи в цепной передаче в результате износа втулок, роликов и зубьев звездочек; заклинивании подшипников качения и скольжения; разрушении шарниров рулевого управления и подвески; накладок и колодок муфт сцепления и тормозов и т.д. Обычно для каждого механизма из сведений по эксплуатации известна предельно допустимая величина линейного износа $\Delta h_{пр}$. Например, для пары вал-втулка подшипника скольжения, $\Delta h_{пр} = h - h_0$, где h_0 , h - значения начального и текущего зазоров в сопряжении. Однако за расчетную предельную величину износа принимают $\Delta h_{пр*} = h_{пр} / n$, где n - коэффициент запаса.

Условие безотказной работы

$$Y = \Delta h_{пр*} - \Delta h > 0, \quad (5.40)$$

где Δh - текущее значение износа.

Входящие в это неравенство величины являются случайными. Обычно считают, что все они распределены по нормальному закону:



Р и с. 5.54. Кривые надежности

$$f = \frac{dN}{Ndx} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (5.41)$$

Здесь под x понимают величину износа $\Delta h - \Delta \bar{h}$, где $\Delta \bar{h}$ - среднее арифметическое значение Δh_0 . Для достаточно большого числа испытаний ($N > 50$)

$$\Delta \bar{h} \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta h_i. \quad (5.42)$$

Среднее квадратичное отклонение

$$\sigma_{\Delta h} \cong \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta h_i - \Delta \bar{h})^2}. \quad (5.43)$$

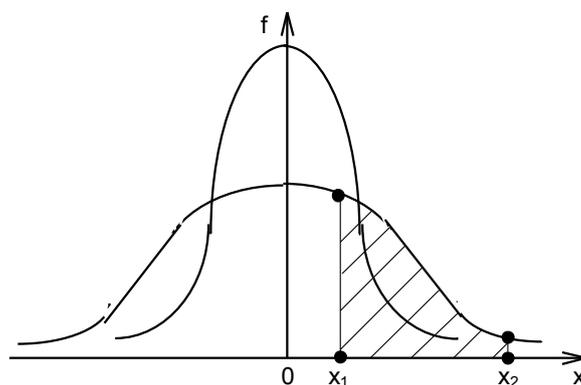
Для системы случайных величин,

$$\sigma_Y = \sqrt{\sigma_{\Delta h_{пр}^*}^2 + \sigma_{\Delta h}^2}. \quad (5.44)$$

На рис. 5.55 представлен вид кривых нормального распределения. Площадь, ограниченная кривой и осью абсцисс, равна 1, т.е.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f dx = 1.$$

Чем больше среднее квадратичное отклонение, тем более полно идет кривая. Заштрихованная площадь равна вероятности того, что $x_1 \leq x \leq x_2$. Для нормального закона, если $-\sigma \leq x \leq \sigma$, $-2\sigma \leq x \leq 2\sigma$, $-3\sigma \leq x \leq 3\sigma$, вероятности соответственно составляют 0,68; 0,95; 0,99.



Р и с. 5.55. Кривые нормального распределения

Таким образом, вероятность реализации соотношения (5.39), т. е. безотказной работы,

$$W = 1 - \int_{\Delta h_{пр}^* - \Delta \bar{h}}^{\infty} f dx = 1 - \Phi \left(-\frac{\Delta h_{пр}^* - \Delta \bar{h}}{\sigma_Y} \right). \quad (5.45)$$

Величина, стоящая в скобках, - квантиль нормального распределения. Отношение среднего квадратического отклонения к среднеарифметической величине называется коэффициентом вариации и характеризует относительную точность определения износа. Для предельного значения и произвольной величины износа коэффициенты вариации

$$\gamma_{\text{пр}^*} = \frac{\sigma_{\Delta h_{\text{пр}^*}}}{h_{\text{пр}^*}}; \gamma = \frac{\sigma_{\Delta h}}{h}. \quad (5.46)$$

Средний интегральный износ

$$\Delta h_{\text{цп}} = j_1 + j_2 \cdot t, \quad (5.47)$$

где $j_{1,2}$ - скорости изнашивания первого и второго элементов пары трения. Соотношение (5.46) справедливо для изнашивания с постоянной скоростью. Для периода приработки, когда скорость изнашивания меняется с течением времени, для расчета износа можно воспользоваться соотношениями, приведенными в главе "Изнашивание".

В качестве критерия долговечности используется ресурс – время, в течение которого достигается предельное состояние узла либо машины в целом с заданной вероятностью $W=\gamma$ (гамма-процентный ресурс). В технике, в частности для автомобилей, принимают $\gamma=0,9$ (90%). Ресурсные испытания проводятся предприятиями-изготовителями или специальными НИИ по 20000, 50000-часовым программам. Ресурс (T_γ) - случайная величина, распределенная по некоторому закону. Часто используется нормальный закон. Однако в последнее время стали предлагаться и другие законы распределения, которые, как считают некоторые специалисты, более точно описывают результаты испытаний. Таким образом, обрабатывая результаты испытаний, приняв гипотезу о законе, который описывает распределение ресурса, определяют гамма-процентный ресурс. Поскольку испытания имеют затяжной характер и требуют больших материальных затрат, иногда используют методы ускоренных испытаний, ужесточая режим. Результаты пересчитываются на реальные объекты с использованием методов теории подобия. Такой подход требует постановки небольшой серии поверочных испытаний.

Поскольку испытания являются важнейшим инструментом в руках конструктора, применение статистических методов имеет важнейшее значение для обеспечения корректности и достоверности оценки параметров надежности узлов трения.

1.28. 5.5. Технологические методы обеспечения высокой износостойкости узлов трения

Существующие технологические методы обеспечения износостойкости поверхностей деталей узлов трения подразделяют на несколько групп: химико-термические, объемная и поверхностная закалка, электрохимические, химическая обработка, механотермические, наплавка износостойких слоев, напыление порошковых покрытий, ионно-плазменная обработка, плакирование, механическое упрочнение и др. Применение этих методов в значительной мере связано с историей развития автомобилестроения в развитых странах. Само развитие этих методов было вызвано стремлением повысить эксплуатационные качества автотранспортных средств.

Химико-термическая обработка (ХТО)

Целью ХТО является создание на стальной поверхности тонкого легированного слоя за счет диффузии извне легирующих элементов. Затем поверхность подвергается закалке. Поверхностный слой приобретает высокую твердость (до 60 и более единиц по шкале Роквелла). Сюда относятся цементирование, азотирование, борирование, насыщение хромом, никелем, цианирование (насыщение одновременно азотом и углеродом), борохромирование (одновременное насыщение бором и хромом), карбоборирование (одновременное насыщение углеродом и бором) и др.

Толщина упрочненного слоя может превышать 2 мм. Химико-термическая обработка получила наибольшее распространение, как метод упрочнения поверхностей из-за простоты, доступности и высокой эффективности. Так, например, цементация осуществляется в твердом, жидком и газообразном карбюризаторах. В качестве твердого карбюризатора используется древесный уголь. Процесс протекает медленно: скорость науглероживания порядка 0,1 мм/ч. Однако, если повысить температуру до $950\div 980^{\circ}\text{C}$, процесс существенно ускоряется. В качестве газового карбюризатора используются углеводороды, а жидкого - расплавы солей, содержащих углерод. Наиболее эффективна газовая цементация с нагревом детали токами высокой частоты.

Азотированию подвергаются стальные детали при более низкой, чем при цементировании, температуре: $520\div 560^{\circ}\text{C}$. Легирующие элементы, входящие в состав стали (Cr, Mo, V, Al), образуют с азотом стойкие нитриды. Наибольшую твердость придает алюминий, однако поверхностный слой приобретает повышенную хрупкость и наблюдается искажение формы изделия. Азотирование придает деталям высокую циклическую прочность и соответственно стойкость против усталостного изнашивания. Поэтому азотированию подвергают коленвалы, цилиндры, поршневые кольца, седла клапанов, зубья шестерен. Ресурс шеек азотированных коленвалов превосходит амортизационный срок двигателя. Кроме износостойкости, азотирование придает деталям и высокую коррозионную стойкость. Износостойкость сохраняется при нагреве до $500\div 600^{\circ}\text{C}$ (что весьма важно для ДВС), в то время как при нагреве цементированной поверхности выше $225\div 275^{\circ}\text{C}$, твердость ее, а следовательно и износостойкость снижаются. Недостатком метода является увеличение деталей в размере и коробление. Поэтому азотированные элементы деталей подвергают окончательной обработке в виде полирования или шлифования.

Цианирование (нитроцементация) происходит в жидких (расплавы солей) и газовых азотно-углеродных средах. Низкотемпературное цианирование осуществляется при температуре $530\div 650^{\circ}\text{C}$, имеет небольшую скорость и применяется для высоколегированных инструментальных высокоуглеродистых сталей и легированных сталей с содержанием углерода до 0,4%. Обработке подвергаются ответственные резьбовые соединения, втулки, зубчатые колеса, вилки механизма коробки перемены передач, ролики, кулачковые пары. Наиболее гибким процессом является газовое цианирование. Оно поддается автоматизации и позволяет

управлять содержанием С и N в отдельности. Преимущество цианирования перед цементированием и азотированием - большая скорость процесса и более высокий упрочняющий эффект.

Аналогична и технология диффузионного насыщения рабочих поверхностей деталей бором, хромом, никелем, серой в отдельности либо в различных комбинациях.

Поверхностная закалка

Эта операция сопровождает химико-термическую обработку, а также имеет и самостоятельное значение. В самостоятельном виде она применяется для образования твердого износостойкого слоя на поверхности деталей из средне- и высокоуглеродных сталей и некоторых чугунов. Ей предшествует объемная термообработка: нормализация или объемная закалка и высокий отпуск. Она состоит из двух операций: нагрева поверхностного слоя и быстрого его охлаждения. По способу нагрева различают следующие методы поверхностной закалки: высокочастотный, контактный, плазменный, при нагреве в электролите, лазерный.

Наиболее распространенным и эффективным является высокочастотный метод нагрева. К генератору высокой частоты подключается охлаждаемая катушка из нескольких витков. Внутри катушки возникает высокочастотное электромагнитное поле, в которое помещают деталь. Вследствие явления электромагнитной индукции в детали возникают вихревые токи (токи Фуко), которые текут лишь в тонком поверхностном слое, где и выделяется вся образующаяся теплота. Поверхностный слой разогревается до температуры закалки за очень короткое время, недостаточное для того, чтобы тепло распространилось вглубь детали. Затем нагретая поверхность резко охлаждается потоком жидкости (обычно воды). В результате закаливается тонкий поверхностный слой, основа же при этом остается вязкой, что предохраняет деталь от хрупкого излома при циклическом действии нагрузки.

Поверхностная закалка с электроконтактным нагревом осуществляется путем пропускания переменного тока через контакт детали с электродом в виде катящегося по поверхности детали ролика. Применяется ток промышленной частоты низкого напряжения. Источником тока является однофазный сварочный трансформатор. Из-за высокого электросопротивления в месте контакта ролика с деталью выделяется большое количество теплоты, и зона контакта разогревается до температуры закалки. Нагретая поверхность охлаждается струей воды.

Плазменные методы предусматривают нагрев поверхности за счет обработки струей низкотемпературной плазмы. Плазма получается двумя способами. Первый способ заключается с использованием обычных газовых горелок, применяемых для резки и сварки металлов. В качестве сгорающей газовой среды используется смесь кислорода с ацетиленом либо другими углеводородами. Другой способ предусматривает использование разогретой струи инертного газа, продуваемого через зону дугового разряда. Устройство, генерирующее струю такой плазмы, называется плазмотроном. В качестве источника плазмы обычно используют аргон.

Нагрев в электролите осуществляется путем помещения детали в ванну с раствором кальцинированной соды или поташа. Ванну подключают к положительному полюсу источника постоянного тока, а деталь - к отрицательному. При достаточно большой силе тока поверхность детали быстро нагревается за счет того, что выделяющийся в результате электролиза водород образует на поверхности оболочку, обладающую высоким электросопротивлением. Эта оболочка является одновременно тепловым экраном, предотвращающим рассеивание тепла в электролит. Таким методом закаливают штанги толкателей и стержни клапанов газораспределительного механизма ДВС и ряд других деталей.

В последние годы все большее распространение получают лазерные технологии. Они отличаются высокой культурой производства и эффективностью. Лазерное излучение в инфракрасном диапазоне, сфокусированное в пятно диаметром порядка десятка микрометров, совершает пилообразное движение (сканирование) по поверхности детали, покрывая весь выделенный под закалку участок. Скорость нагрева микрообъемов детали, взаимодействующих с лучом, и последующего охлаждения достигает 10^6 К/с. Это обеспечивает закалку поверхностного слоя, глубина которого регулируется за счет изменения скорости сканирования. Сканирование производится путем перемещения детали по заданной программе специальными механическими устройствами. Используются как твердотельные лазеры, работающие в импульсном режиме, так и газовые с непрерывным процессом излучения. Лазерная закалка обеспечивает получение однородной мелкокристаллической поверхностной структуры, обладающей повышенной твердостью и износостойкостью. После термообработки лазерным лучом не происходит коробление элементов рельефа детали, не наблюдается заметное ухудшение качества поверхности. Из-за высокой стоимости процесса лазерной закалки подвергаются самые дорогостоящие и ответственные детали, например коленвалы ДВС.

Эффективным методом повышения износостойкости деталей является лазерное легирование с одновременной закалкой поверхностного слоя. Поверхность, подлежащая обработке, покрывается тонким слоем вещества, содержащего легирующие элементы. Так же, как и при лазерной закалке, луч сканирует по поверхности детали. Однако режим сканирования подбирается таким, чтобы температура в микрообъемах поверхности обеспечивала плавление. Таким образом проплавляется весь поверхностный слой. В процессе плавления легирующие элементы внедряются в кристаллическую решетку материала детали. Замечательным является то, что из-за высокой скорости нагрева и последующего охлаждения, помимо твердых растворов легирующих элементов, в материале детали возникают метастабильные структуры с избыточным по сравнению с твердым раствором содержанием легирующего элемента. Таким образом, возникает возможность внедрения в кристаллическую решетку даже такого элемента, с которым вещество детали вообще не может образовать твердого раствора. Такие метастабильные структуры, будучи прочно связаны с основой, обладая при этом сверхвысокой твердостью, обеспечивают резкое повышение износостойкости.

В качестве примера приведем способ резкого упрочнения алюминиевых сплавов. Упрочняющим элементом преимущественно является кремний. Для образо-

вания твердого раствора в алюминий можно вводить не более 12% кремния. Избыточный кремний выпадает в виде крупных вкраплений и не вызывает роста твердости материала. Лазерный метод позволяет вводить в алюминий до 40% кремния и выше. Избыточный кремний образует мелкодисперсную равномерно распределенную в объеме фазу, резко упрочняющую материал. При этом твердость поверхностного слоя становится сравнима с твердостью закаленной стали. Одновременно снижается свойственная алюминию адгезионная активность и резко улучшаются эксплуатационные свойства деталей из алюминиевых сплавов. Таким способом повышают износостойкость поршней ДВС, цилиндровых гильз.

Электрохимические покрытия

Их наносят на поверхности методом электролиза, что широко используется в современной технологии. Чаще всего применяются электролитическое хромирование, серебрение, нанесение покрытия из олова, свинца, цинка, индия и сплавов легкоплавких металлов. Вещества могут наноситься как непосредственно рабочие слои, так и как элементы многослойных покрытий.

Одно из главных мест занимает хромирование с целью повышения износостойкости. Хром обладает высокой твердостью, хорошим сцеплением со сталью и высокой химической стойкостью. Все элементы подшипников качения подвергаются хромированию. Для повышения тепло- и кислотостойкости покрытие обрабатывается парами бензина при температуре около 1000°C. При этом углерод вступает в химическое соединение с хромом с образованием карбидов, которые заполняют микротрещины в покрытии. Гладкие хромовые покрытия, обладающие плохим смачиванием маслами, плохо прирабатываются, поэтому часто используются пористые покрытия. Такие покрытия наносят на поршневые кольца. Масло, находящееся в порах, предотвращает схватывание в ходе приработки. У хромированных гильз цилиндров ДВС поры заполняют мелкодисперсным дисульфидом молибдена, что также способствует приработке. Хромовое покрытие обладает высоким сопротивлением износу в условиях граничной смазки. Хром, мало изнашиваясь сам, мало изнашивает и сопряженную стальную поверхность. Это было установлено при изучении изнашивания стальных гильз цилиндров и поршневых колец ДВС.

Серебро наносится гальваническим методом, преимущественно на детали электроконтактных устройств. Применение серебряных, а также золотых и палладиевых покрытий позволяет резко снизить переходное сопротивление в скользящих электрических контактах. Использование серебра как антифрикционного материала оказалось малоэффективным.

В технике подшипников скольжения широко применяются электролитические покрытия деталей оловом, свинцом, индием и другими мягкими и пластичными металлами и сплавами. Использование таких покрытий позволяет ускорить приработку поверхностей деталей. Наиболее часто используются оловянные и олово-свинцовые покрытия. Олово и олово-свинцовые сплавы хорошо сцепляются с основой. Из-за низкой твердости покрытия существенно возрастает фактическая

площадь контакта и снижаются контактные напряжения. Покрытия наносят на вкладыши подшипников скольжения ДВС. Покрытия из чистого свинца не применяются из-за низкой коррозионной стойкости к воздействию кислот, содержащихся в смазочных маслах. Покрытия цинком применяются при производстве кузовных деталей автотранспорта. При этом срок службы покрытия достигает десяти лет.

Химическая обработка

Данный метод предназначен для создания защитных слоев за счет химических реакций. Большой интерес представляют никель-фосфорные покрытия, получаемые за счет выделения металлов из раствора их солей с помощью химических препаратов - восстановителей. Покрытие содержит $92 \div 95\% \text{Ni}$ и $5 \div 8\% \text{P}$. Прочность сцепления с основой повышается за счет термообработки покрытия. Термообработка также повышает твердость и антикоррозионность. Покрытия хорошо прирабатываются, причем в ходе приработки вследствие высокой пластичности материал покрытия с вершин выступов частично перетекает во впадины микро-рельефа. Повышается фактическая площадь контакта и снижаются контактные напряжения. Однако покрытия имеют низкую стойкость к циклическому нагружению и способны отслаиваться.

Значительное место в технологии повышения износостойкости занимают оксидирование и фосфатирование. Оксидирование - это искусственное создание оксидной пленки. На стали формируется пористая пленка окиси железа Fe_3O_4 малой толщины (до 3 мкм), имеющая малую твердость и хорошее сцепление с основой. Она хорошо удерживает смазку, предотвращает заедание и, разрушаясь, образует тонкий абразив, способствующий приработке. Пленку получают разными путями: химическим, электрохимическим, термическим и термохимическим. Химическая обработка осуществляется в щелочных и кислотных средах при температуре раствора $138 \div 165^\circ\text{C}$. Образующаяся пленка помимо оксидов содержит некоторое количество фосфатов. Применяется также обработка паром. Термическое и химико-термическое оксидирование проводится путем нагрева деталей в расплавленной селитре либо на воздухе.

Важное значение имеет нанесение защитной оксидной пленки на поверхность деталей из алюминия и его сплавов. Оксидная пленка имеет высокую твердость и при химическом оксидировании обладает толщиной до 5 мкм. Пористая пленка пропитывается смазочными маслами, содержащими коллоидный графит, либо дисульфид молибдена, что придает подшипниковым вкладышам высокие антифрикционные свойства. Часто защитные пленки получают электрохимическим путем толщиной до 0,3 мм методом глубокого анодирования. Утолщение пленки происходит как за счет проникновения вглубь детали, так и наращивания на поверхности. Таким образом, увеличивается размер детали. Хороший результат дает глубокое анодирование поршней ДВС. Резко снижается износ, повышается надежность из-за уменьшения вероятности заклинивания.

Прогрессивным способом химической обработки поверхностей деталей является фосфатирование - формирование пленки из нерастворимых фосфорнокислых солей. Пленка формируется при температуре около 100 °С в среде раствора. Толщина пленки достигает 50 мкм. Размеры детали меняются слабо. Она прочно сцеплена с основой, жаростойка (до 600 °С), устойчива к воздействию кислот, содержащихся в смазке, имеет низкую твердость и высокую пористость. Она пропитывается маслом, содержащим твердосмазочные добавки, и хорошо защищает детали от задира. Успешно используется для защиты поверхностей цилиндрических гильз, поршневых колец, вкладышей подшипников, пальцев верхних головок шатунов, резьбовых соединений.

Одним из эффективных способов химической обработки поверхностей является сульфидирование, заключающееся в обогащении поверхностных слоев стальных деталей серой. Сульфидирование проводят в жидкой, твердой или газовой серосодержащих средах. Оно может быть низко-, средне- и высокотемпературным (150÷450, 540÷580, 850÷950 °С соответственно). В зависимости от состава сернистой среды, температуры и длительности процесса наряду с FeS, FeS₂ образуются и другие железо-серные соединения. Жидкое сульфидирование осуществляется в соляных ваннах. Глубина сульфидированного слоя достигает 50 мкм. Разновидностью сульфидирования является сульфоцианирование, при котором поверхность одновременно насыщается серой, азотом, углеродом при температуре 540÷580°С в жидкой среде. Применяется и сульфидирование в твердой среде порошка сернистого железа. Шероховатость у прошедших сульфидирование поверхностей значительно выше исходной, несколько увеличиваются размеры деталей. В процессе эксплуатации сульфидная пленка, менее прочная, чем основной металл, легко разрушается и отделяется, предотвращая схватывание. Сульфидный слой и мягкие слабоабразивные продукты износа обладают высокой адсорбционной способностью и активируют молекулы масла. Благодаря таким свойствам приработка ускоряется, и быстро устанавливается равновесная шероховатость с высоким качеством, приближающаяся к 9÷10 классам. Интересно то, что по мере износа под влиянием температуры и давления атомы серы диффундируют вглубь поверхности, повышая антифрикционные свойства. В результате насыщенный серой слой значительно превышает первоначальный по своим противоизносным свойствам. В ДВС благодаря циркуляции смазки наличие сульфидированных деталей приведет к улучшению условий работы всех трущихся пар, так как сульфиды, переносимые маслом, попадают на все поверхности трения. Сульфоцианирование, в дополнение к сульфидированию, не только ускоряет приработку, но и существенно повышает износостойкость за счет повышения твердости и усталостной прочности. Сульфидируют и сульфоцианируют цилиндрические гильзы и поршневые кольца ДВС, стальные подшипники скольжения, резьбовые соединения, детали шарниров подвески.

К современным методам создания защитных пленок на поверхностях ответственных деталей относится химическое воздействие газовой среды при определенных значениях температуры и давления (иногда с применением пучков ускоренных ионов). Примером такого метода является создание на поверхности прочно

связанного с основой слоя дисульфида молибдена. Для этого на деталь наносится электролитическим путем слой молибдена. Затем поверхность при определенной температуре и давлении обдувают парами серы. Дисульфид молибдена, образующийся в ходе поверхностной реакции, прочно связывается с основой и образует надежное твердосмазочное покрытие. Если затем поверхность бомбардировать ускоренными ионами, то кристаллы дисульфида молибдена плоскостями наименьшего сопротивления сдвигу устанавливаются параллельно поверхности детали, и коэффициент трения по такой поверхности близок к нулю (аномально низкое трение). Другим примером такого способа создания покрытия является формирование на поверхности тонкой алмазной пленки, обладающей высочайшей износостойкостью. В этом случае специально подготовленная поверхность детали при соответствующих диаграмме фазового равновесия углерода значениях температуры и давления обдувается одним из углеводородов. На поверхности образуется тонкая (до 10 мкм) пленка углерода в виде алмаза. Здесь мы говорим уже о технологии XXI века.

Механотермическое формирование износостойких покрытий

Метод заключается в том, что защитный слой кристаллизуется из расплава в стесненных условиях под нагрузкой. При этом в нем отсутствуют полости и сквозные поры, основной металл практически не подплавляется и не попадает в наплавляемый слой, который надежно соединяется с основой. Используют две технологические схемы: фрикционное и электроконтактное формование.

Первая технологическая схема включает в себя прижатие с определенным усилием к поверхности детали сухарей из материала будущего покрытия. Возможен и другой вариант: с помощью пуансона прижимается брикет из гранул или стружки. Затем покрываемая поверхность с заданной скоростью приводится в циклическое движение. Наносимый материал трется о поверхность детали, на границе выделяется теплота. В какой-то момент времени температура контакта достигает точки плавления. Плавление, а следовательно формирование износостойкого слоя, происходит под давлением от 5 до 100 МПа при скорости скольжения $1 \div 8$ м/с. При этом время формирования слоя составляет $5 \div 70$ с. Этим способом создается покрытие толщиной от 0,5 до 10 мм. На стальную основу наносятся слои из медных, алюминиевых и других сплавов. Метод имеет ряд ограничений. Он применим для деталей цилиндрической формы, приводимых во вращение. Температура плавления материала покрытия должна быть меньше, чем у материала основы. Этот метод успешно применяется для создания медного покрытия на поверхностях гильз цилиндров ДВС, что стимулирует возникновение режима избирательного переноса. При испытаниях пара цилиндр - поршень практически не изнашивается.

При электроконтактном формировании тепло выделяется в результате прохождения электрического тока через обладающий большим сопротивлением гранулированный материал, прижимаемый с заданным давлением к поверхности детали. Здесь форма поверхности детали может быть любой. Температурные ограни-

чения тоже отсутствуют. Этим методом на сталь наносится широкий спектр материалов: легированные стали, твердые сплавы, износостойкие композиции. Таким же образом осуществляется электроконтактная наплавка, основанная на принципе контактной сварки. Наплавляемый материал (обычно в виде ленты) прижимается к поверхности детали электродом. Между электродом и деталью прикладывается разность потенциалов от 2 до 12 В. Можно использовать в качестве источника тока сварочный трансформатор. Если наплавляют длинномерные детали, то электрод делают в виде ролика, катящегося по детали и осуществляющего приварку защитного покрытия.

Наплавка износостойких слоев

Это один из наиболее распространенных способов восстановления изношенных деталей автотранспортных средств. Имеется большое число методов наплавки, которые различаются источниками тепловой энергии, способами защиты наплавляемого металла, уровнем автоматизации. Однако все виды наплавки имеют общие металлургические и физико-химические основы. К ним относится расплавление наносимого металла с частичным расплавлением поверхностного слоя, перемешивание расплавов, кристаллизация.

Наибольшее распространение получила электродуговая наплавка, осуществляемая ручным и полуавтоматизированным способами. При механизированной наплавке вместо отдельных электродов применяется свернутая в бухту проволока либо электродная лента. Чаще всего применяется наплавка под слоем флюса. Порошковый флюс, непрерывно подаваемый в зону дуги образует над швом шлаковую оболочку, которая из-за низкой теплопроводности уменьшает скорость охлаждения наплавленного материала, что способствует нормализации структуры, а также защищает шов от окисления, предотвращает разбрызгивание металла, доля которого во шве колеблется от 30 до 65%, что ухудшает свойства защитного слоя и делает их в значительной мере случайными величинами. Наплавка под флюсом успешно применяется при восстановлении клапанов автомобильных двигателей, осей шарниров и других сильноизнашиваемых деталей. Качество покрытия заметно улучшается, когда исключается контакт наплавляемого материала с кислородом воздуха. Для этого процесс проводят в среде углекислого газа, аргона и их смесей. Интересен высокоэффективный метод наплавки порошковой проволокой, представляющей собой тонкую трубку из стали с запрессованной в ней порошковой смесью, обеспечивающей получение требуемого состава наплавляемого слоя.

Применение плазменно-дугового вместо обычного электродугового разряда позволило существенно снизить вредное влияние подплавления основного материала. Здесь возможны разные варианты подачи наплавляемого материала в зону наплавки: подача проволоки, проплавление заранее уложенной проволоки (так наплавляют клапана ДВС), вдувание наплавляемого порошка вместе с потоком плазмы. Последний метод предпочтителен, поскольку позволяет полностью автоматизировать процесс.

Напыление покрытий из порошковых материалов

Этот метод является одним из наиболее эффективных способов создания износостойких слоев. Если в высокотемпературную струю газа подать частицы порошка или капли расплава, то при столкновении с поверхностью они деформируются и прочно прикрепляются к детали. Существует две разновидности такой технологии: газоплазменное напыление и электрическое напыление. В газоплазменном методе тепло выделяется в результате сжигания смеси горючего газа с кислородом, в электрическом - источником тепла является электрическая дуга. Для газоплазменного напыления в кустарных условиях производства используют обычные газовые горелки, обеспечивающие плавление и разбрызгивание материала проволоки, подаваемой в зону факела. В качестве источника высокотемпературной и скоростной струи удобно использовать плазмотрон (принцип действия которого описан выше). В этом случае напыляемый порошок подается в струю плазмы. Имеются и электродуговые устройства, в которых через зону плавления в дуговом разряде двух проволочных электродов вдувается сжатый воздух. Струя раскаленного воздуха вместе с каплями расплава направляется на поверхность детали.

Другим вариантом нагрева напыляемого материала является использование индукционных токов высокой частоты, возникающих в проволоке, проходящей через охлаждаемый соленоид, генерирующий высокочастотное электромагнитное поле. Через катушку продувается струя воздуха, которая подхватывает капли расплавленной проволоки и ударяет их о поверхность детали.

Главным достоинством метода напыления является его универсальность - независимость от природы материала детали. Можно наносить покрытия не только на металлы, но и на керамику, дерево, бетон, полимеры, ткани, бумагу. Это связано с тем, что напыление не оказывает заметного теплового воздействия на основу. То же можно сказать и о напыляемых материалах. Напыляют цветные металлы и сплавы, стали, твердые сплавы и керамику, пластмассы, декорирующие смеси. Не имеют также особого значения форма и размеры деталей.

Напыление широко применяется для восстановления формы изношенных деталей. Большую роль играет подготовка поверхности под напыление. Поверхность должна быть хорошо очищена от загрязнений, иметь шероховатость и пористость. Это гарантирует хорошее сцепление наносимого материала с основой. Поверхности обезжиривают с помощью промывки в растворителях (бензин, бензол, ацетон, четыреххлористый углерод и т.д.). Для устранения дефектов поверхностной структуры используется обработка струей абразива (пескоструивание).

В последнее время для нанесения износостойких твердосплавных покрытий используется метод детонационного напыления. Установка для детонационного напыления напоминает пулемет, стреляющий порциями разогретого порошка. В замкнутую камеру сгорания, к которой прикрепляется ствол, подается смесь кислорода и горючего газа (ацетилен, пропан-бутан и др.). Ствол направляют на напыляемую поверхность. Через загрузочное отверстие в камеру подается порошок. Смесь поджигается электрической искрой и взрывается. Раскаленные частицы вместе с продуктами сгорания ударяются об обрабатываемую поверхность и за-

крепляются на ней. Температура частиц в момент удара достигает 4000°C. Частота выстрелов - 3÷4 в секунду. Недостатком метода является неравномерное распределение материала по поверхности, что устраняется путем отделочной обработки шлифованием. Так создают покрытия из металлокерамики: карбидов вольфрама, титана и кобальта, нитридов титана и бора, окиси алюминия. Покрытия обладают высокой твердостью и износостойкостью. Износ снижается до 10 раз.

Газотермическое напыление успешно используется в автомобилестроении и при ремонте и эксплуатации автотранспортных средств. Износостойкость коленвалов грузовых машин марки ГАЗ после нанесения газотермического покрытия повышается до 4 раз. Такой же результат получается при напылении покрытия на поршневые кольца взамен электролитического хромирования. Хороший результат дает нанесение покрытия из двуокиси алюминия.

Ионно-плазменные методы

Данные методы весьма эффективны. В связи с тем, что их применение требует высокого разрежения, они осуществляются в вакуумных камерах, поэтому являются достаточно дорогостоящими и применяются лишь для весьма ответственных деталей, работающих при высоких температурах в условиях адгезионного и окислительного изнашивания. В условиях вакуума наносимый металл превращается в газ, пар, ионизированный пар и плазму, а затем в атмосфере реакционного или инертного газа оседает на поверхности детали. Покрытие может быть получено способами термического испарения, катодного или ионно-плазменного распыления или с помощью бомбардировки поверхности потоком из частиц осаждаемого вещества. В качестве реакционного газа применяются азот или углеводород, в результате формируется нитридное или карбидное покрытие.

Имеется несколько разновидностей метода. Катодное распыление основано на использовании расположенных в вакуумной камере 2-х электродов. После откачки воздуха камера заполняется аргоном, на электрод с деталью подают отрицательный потенциал. Поверхность детали очищается в газовом разряде путем бомбардировки ионами. Далее отрицательный потенциал подается на испаряемый материал, который распыляется и ионизируется в плазме разряда. Частицы осаждаются на детали, создавая покрытие. Если использовать реакционный газ, пролетая через который атомы металла образуют нитриды, карбиды или окислы, можно получить требуемый структурно-фазовый состав покрытия. Скорость осаждаемых частиц достигает 10 км/с, поэтому они прочно сцепляются с основой. Наилучшие результаты получаются при использовании для испарения лучевых методов нагрева (электронно-лучевого и лазерного). Применяется дополнительное ускорение ионов наложением электрического поля.

Широко распространена технология нанесения покрытий из плазмы дугового разряда с холодным катодом. Материал испаряется катодным пятном электрической дуги - сильноточным низковольтным разрядом, развивающимся в парах материала электродов. Между анодом и катодом из напыляемого материала возни-

кает разряд, протекающий в парах продуктов эрозии катода. Металлическая плазма выделяется из микропятен катода, в зонах которых возникают локально высокая температура и давление. Прикладывая к детали ускоряющий потенциал, повышают скорость генерируемых в плазме ионов. Такая технология реализуется в имеющихся на многих предприятиях установках "Булат". Наиболее часто наносят покрытия из TiC, TiN, Al₂O₃ - наиболее твердых износостойких материалов. Развитие метода связано с внедрением плазменных ускорителей, формирующих сфокусированный высокоскоростной ионно-плазменный пучок, сканирующий поверхность детали. Здесь так же, как и в электронно-лучевой трубке, фокусирование пучка и сканирование осуществляются с помощью электростатических, магнитных линз и отклоняющих пластин. Покрытия имеют небольшую толщину 4÷10 мкм, вызывают заметное улучшение качества поверхностей, обладают высокой коррозионной стойкостью. Они используются для повышения износостойкости металлообрабатывающего инструмента, коленвалов, деталей топливной аппаратуры дизелей, клапанов и т.д.

Плакирование

Метод создания толстослойных покрытий применяется при изготовлении деталей или при восстановлении их формы после изнашивания. При этом толщина слоя может составлять несколько миллиметров. Плакирование также используется при изготовлении элементов скользящих электрических контактов в целях экономии дорогостоящих материалов с высокой электропроводностью, например серебра.

Толстослойные покрытия часто наносятся методом прокатки. Сцепление слоев осуществляется за счет диффузии, стимулируемой высокой температурой. Применяются также диффузионная и электроконтактная сварка, наплавка, припайвание и другие способы. Таким методом получают биметаллические полосы, кольца. Часто наносится слой из порошковых металлов и керамики. Слои припекаются в конвейерных печах и прокатываются вместе с основой в горячем состоянии. Суспензия порошков (смеси с летучими жидкостями с добавкой клеящего вещества) может наноситься по способу шликерного литья. Затем детали просушиваются. На поверхности образуется равнотолщинный слой, удерживаемый клеем. Детали поступают в печь, клей выгорает, а наносимый материал припекается к основе. Образуется пористое твердое покрытие, которое затем пропитывается каким либо служебным материалом, например фторопластом.

Механическое упрочнение поверхностей

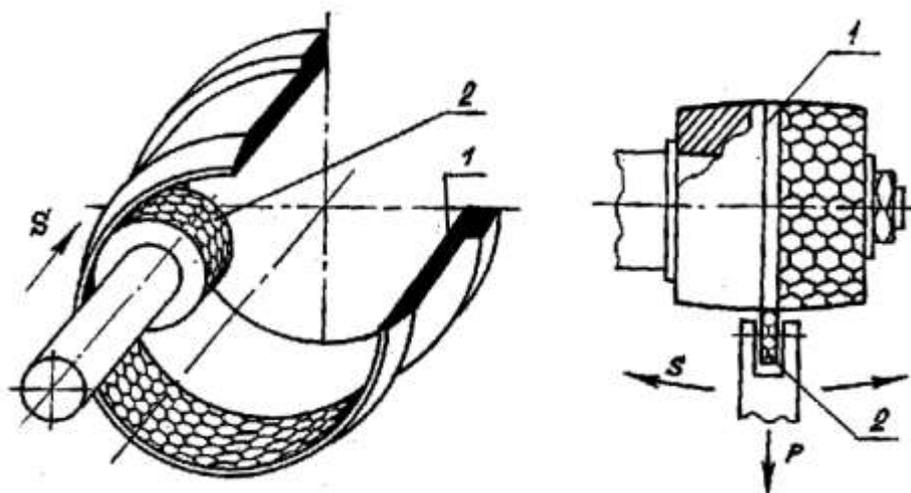
Привлекают простота и дешевизна этого метода. Здесь используется явление значительного роста предела текучести, а следовательно и твердости материала, при высокой степени пластической деформации - деформационное упрочнение. Метод реализуется путем обкатывания поверхностей роликами или шариками,

выглаживания сферическими алмазными наконечниками, обработки струей из мелких стальных или стеклянных шариков (дробеструивание). Помимо упрочнения поверхность выглаживается, заметно снижается высота шероховатости. Вершины выступов становятся более пологими, и контакт переходит из пластического в упругое состояние. Возможно также залечивание поверхностных дефектов (микротрещин). Все это существенно повышает усталостную износостойкость, снижает срок приработки. Известны положительные результаты алмазного выглаживания шеек коленвалов дизельных и бензиновых ДВС, поверхностей распредвалов и других деталей.

Известной разновидностью методов поверхностного пластического деформирования (ППД) является технология виброупрочнения, созданная профессором Шнейдером Ю.Г. (С.Петербург). В этом способе выглаживающему индентору сообщается колебательное (вибрационное) движение и при совмещении колебательного движения индентора с поступательным по обрабатываемой поверхности при малой скорости движения можно получить полностью наклепанную поверхность, а при увеличении скорости - синусоиды или их переплетение. В этом случае говорят о частично упрочненной поверхности, которая выглядит как рельеф, называемый "крокодилова кожа".

В Самарском государственном техническом университете разработан новый технологический способ упрочняющего деформационного формоизменения поверхностей деталей узлов. Способ открывает большие возможности для повышения износостойкости, нагрузочной способности, контактной жесткости и других важных в эксплуатации характеристик узлов трения. Упрочняющее деформационное формоизменение поверхностей (далее УДФ) деталей осуществляется накатным инструментом в виде роликов 2, на периферии которых расположена замкнутая система клиновидных инденторов, например гексагональной структуры (рис. 5.56). Возможны варианты холодного накатывания и накатывания при нагреве. Разработана гамма инструментов, реализующих способ, определена область его применения, оптимизированы технологические режимы обработки, изготовлены вспомогательные приспособления и оборудование для обработки типовых деталей цилиндрической, сферической и плоской формы.

Наиболее значительное повышение износостойкости от применения этого метода происходит в узлах трения, работающих при циклических перегрузках, вибрациях и ударах в местах посадки с натягом, в подшипниках и направляющих скольжения с неблагоприятными условиями смазки, когда на гладких поверхностях реализуются условия для схватывания, задиров, возникновения фреттинг-коррозии и других негативных проявлений. Положительное воздействие основано на создании оптимального рельефа сетки каналов, упрочнении материала (повышении предела выносливости), а также на создании в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Вспомогательные эффекты реализуются в способе благодаря повышению запаса смазки в оттесненных каналах, разделению волн неровностей, лучшей прирабатываемости.

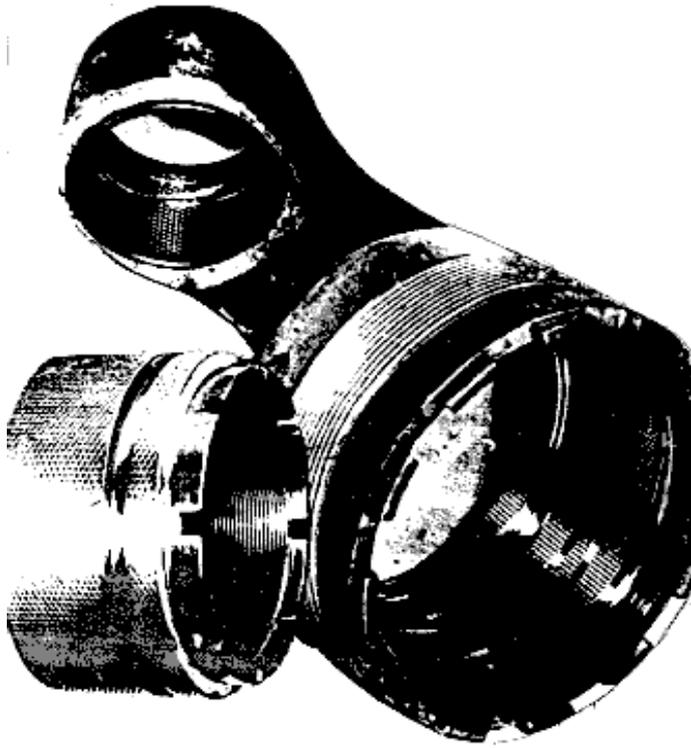


Р и с. 5.56. Схема процесса УДФ

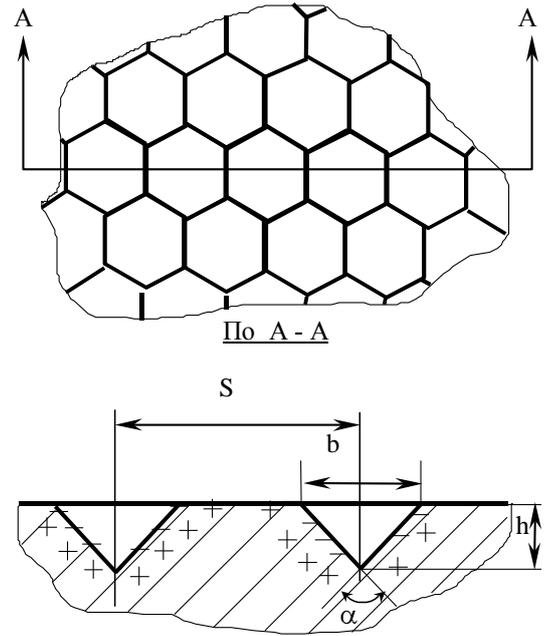
Основными объектами применения УДФ являются: технологии обработки втулок и вкладышей подшипников скольжения, прямолинейных направляющих, номинально неподвижных сопряжений из черных (сталь, чугун) и цветных металлов (латунь, бронза, титановые сплавы), когда формоизмененная поверхность не подвергается дальнейшей механической обработке и является рабочей; обработки контактирующих поверхностей подшипников скольжения или неподвижных сопряжений из черных и цветных металлов и сплавов под металлические и твердосмазочные покрытия; обработки контактирующих поверхностей под металлизацию при восстановлении, ремонте или при получении биметаллических пар трения; обработки поверхностей деталей узлов трения с последующей их обдувкой микрошариками; обработки поверхностей деталей узлов трения с последующим химико-термическим упрочнением и др. Фотография деталей, прошедших УДФ, приведена на рис. 5.57. В частности, для повышения эффективности ХТО в одном из разработанных способов (рис. 5.58) химико-термическая обработка производится после механической деформации с образованием гексагональной сетки каналов.

Подобным образом на трущихся деталях создается слой, диффузионно насыщенный ионорадикалами и радикалами карбонофторида при нагреве в среде инертных газов или вакууме. Деталь помещается в контейнер с порошком карбонофторида в вакууме. Нагрев вызывает активное взаимодействие металла с частицами карбонофторида типа $(CF_x)_n$, что создает прочный износостойкий поверхностный слой. Температура нагрева 200 - 300 °С, давление 10 Па.

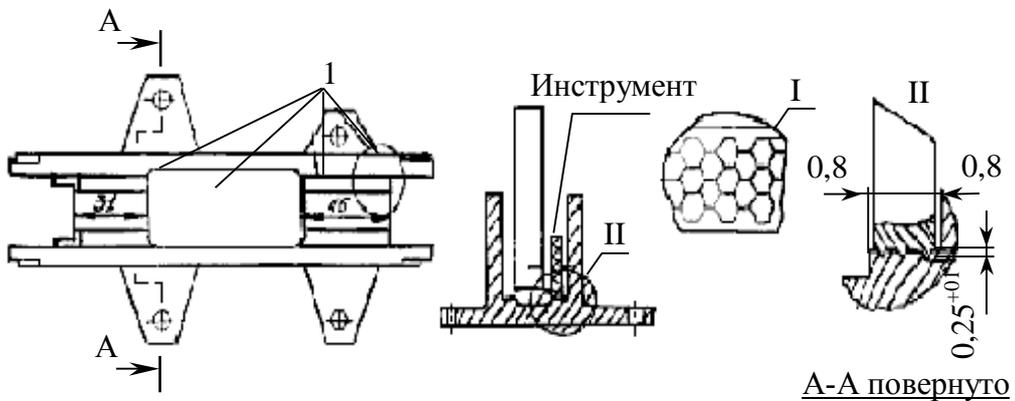
Общие положения проектирования операций. Формоизменение поверхностей производят на завершающих операциях механической обработки путем деформирования заготовки инструментом, изготавливаемым в виде накатных роликов или накладных матриц. В этих целях при обработке тел вращения (см. рис. 5.56) используют токарно-винторезные, сферотокарные и расточные станки. Плоские поверхности могут быть обработаны на строгальных или фрезерных станках, (см. рис. 5.57., 5.58.). На цилиндрических поверхностях деформационное формоизменение возможно как при построчном последовательном проходе всей обраба-



Р и с. 5.57. Иллюстрация применения способа упрочняющего деформационного формоизменения поверхностей деталей

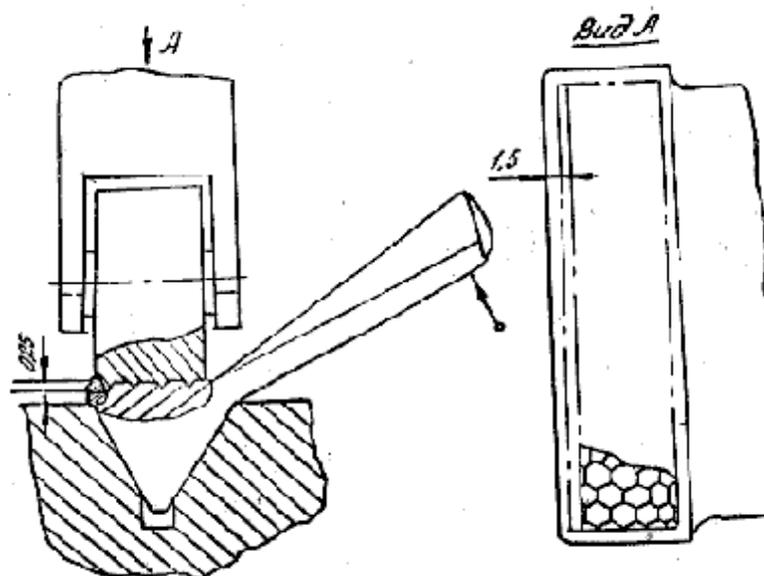


Р и с. 5.58. Совмещение УДФ и ХТО



Р и с. 5.59. Схема операции формоизменения плоской поверхности кронштейна (материал – алюминиево-магниевый сплав; режим обработки: горизонтальная подача стола - 200-500 мм/мин; вертикальная подача – 0,1 мм на один проход; количество проходов - 3; охлаждение – керосин)

тываемой поверхности, так и при подаче инструмента по винтовой линии с осевым шагом, равным ширине ячеек регулярного рельефа, образуемых за один проход.



Р и с. 5.60. Схема операции формоизменения боковых поверхностей замка компрессорных лопаток из сплава ВТ-9 (режим обработки: горизонтальная подача стола - 200-500 мм/мин; вертикальная подача - 0,1 мм на один проход; количество проходов - 3; охлаждение - масло веретенное)

В случае формоизменения сложных фасонных поверхностей или при отсутствии удобных баз может быть использовано прессовое оборудование. При возникновении заусенцев или наплывов по краям отесняемых углублений могут быть проведены тонкое чистовое растачивание, фрезерование или зачистка проволочной щеткой. Выбор типа рельефа и размеров элементов гравюры следует производить с учетом следующих рекомендаций.

1. Для узлов трения, работающих в режиме жидкостного трения, углубления на поверхностях контакта должны быть изолированы друг от друга с целью поддержания гидравлического давления в смазочном слое.

2. Для поверхностей тяжелонагруженных шарниров, смазываемых консистентными смазками, и прямолинейных направляющих целесообразно применять сетку каналов, способствующих подвижности смазки и ее обогащению кислородом с целью предотвращения схватывания.

3. Для тонкостенных втулок с целью уменьшения коробления после обкатки наиболее применим линейчатый рельеф, поскольку эффективность упрочнения здесь достигается не за счет предельных величин деформации материала поверхностного слоя, а текстурированием материала при неоднократном прокатывании или выглаживании.

Оптимальные размеры единичных ячеек с целью повышения нагрузочной способности, предотвращения схватывания, увеличения износостойкости и т.д. устанавливаются по эмпирическим данным, проведенным как в лабораторных, так и в натуральных условиях при эксплуатации серийных изделий. Так, например

для шарниров шасси самолетов, по имеющимся данным, рекомендуется величина ячеек в пределах $S = 1,5 \div 2,2$ мм и параметры сечения каналов $h \times b = 0,3 \times 0,3$ мм.

Формообразующие инструменты. Инструмент для деформационного формоизменения поверхностей выполняется в виде специальных роликов с инденторами различной конфигурации. Более сложными в проектировании и изготовлении являются ролики, создающие гексагональный регулярный рельеф поверхности. При определении их характеристик важным условием является одновременное внедрение инденторов в обрабатываемую поверхность с тем, чтобы при движении обката каждый образуемый выступ подвергался деформации одновременно со всех сторон. Анализ показал, что обеспечение этого условия возможно лишь при заданном отношении контактного участка дуги ролика l к окружному шагу инденторов s (рис. 5.61):

$$\frac{l}{S} = k, \quad (5.48)$$

где k - коэффициент перекрытия.

С учетом глубины внедрения h величину этого коэффициента определяют по формуле

$$k = \frac{4h}{S} \sqrt{\frac{R}{2h} + \frac{1}{12}}. \quad (5.49)$$

Другие конструктивные элементы роликов показаны на схеме однорядного ролика (см. рис. 5.56). В общем случае с учетом коэффициента перекрытия диаметр роликов, мм,

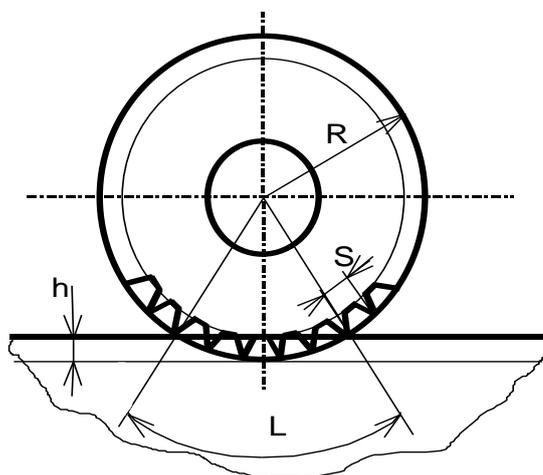
$$D = 0,5k^2 S^2 / h, \quad (5.50)$$

а количество рядов формообразующих инденторов назначается в зависимости от принятой схемы осуществления операции обработки, одно- или многопроходной. Остальные размеры инструмента назначаются из конструктивных соображений.

Примеры повышения демпфирующего эффекта и износостойкости тяжело нагруженных шарниров приведены на рис. 5.62 и 5.63.

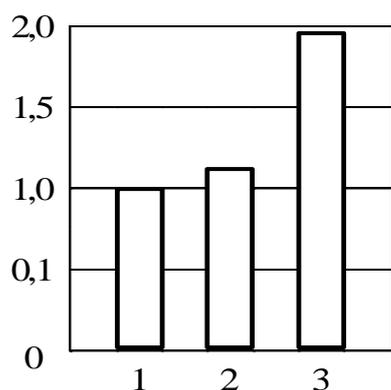
Способ упрочнения деформационного формоизменения поверхностей может быть применен при производстве деталей повышенного ресурса и в ремонтных технологиях, когда необходимо восстановление размеров и форм деталей.

Приведем пример комплексного подхода при ремонте деталей цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания.



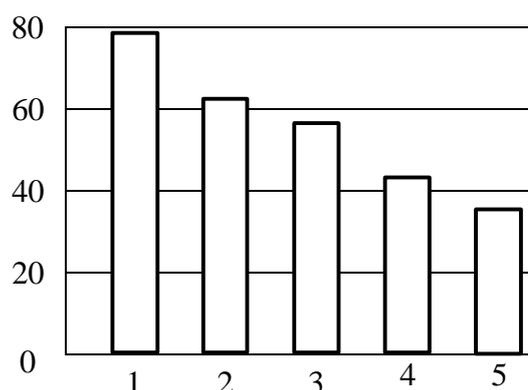
Р и с. 5.61. Геометрические соотношения деформирующего инструмента

Относительное увеличение
рассеяния (демпфирования)



Р и с. 5.62. Относительное увеличение рассеяния механической энергии в шарнирах в результате формоизменения:

- 1 – рассеяние на гладких поверхностях;
- 2 – рассеяние на виброупрочненных поверхностях (шарик $\varnothing 1,3$ мм с пересечением каналов);
- 3 - формоизмененная поверхность бронзовых втулок из БрАЖН 10-4-4



Р и с. 5.63. Примеры относительного увеличения износостойкости втулок шарниров из бронзы БрАЖН10-4-4 при нагрузке 100 МПа (смазка ЦИАТИМ-201):

- 1 - износостойкость поверхностей при наработке 120 ч. без упрочнения;
- 2 и 3 - винтовые канавки глубиной 0,3 мм и шагом 2,0 и 5 мм;
- 4 и 5 - варианты УДД с гексагональной накаткой

Комплексная технология включает мероприятия по восстановлению изношенных гильз цилиндров и поршней, а также другие триботехнологические приемы обеспечения износостойкости трущихся поверхностей.

Восстановление изношенных деталей производится методом *электролитического осталивания*, который получил значительную модификацию в НИИ проблем надежности механических систем при СамГТУ (рук. работ А.Н. Ганин). Процесс осталивания в новой модификации производится на переменном токе, снижены температура и концентрация электролитов, что делает процесс экологически неопасным. Достигнуты высокая производительность и возможность наносить легированный металл, что обеспечивает высокую работоспособность восстановленного слоя металла.

В качестве исходных материалов для приготовления электролита используются дешевые и недефицитные: техническая соляная кислота и стальная стружка; толщина наращиваемого слоя для твердых покрытий может быть получена до 1-1,2 мм.

Повторным покрытием деталей (с промежуточной механической обработкой) толщина слоя может быть значительно увеличена.

Стоимость восстановленных деталей в 2-10 раз ниже стоимости новых деталей.

Производительность рабочего, обслуживающего одну ванну осталивания, равна 8 дм²/ч, а в случае оборудования участка осталивания несколькими ванна-

ми может быть увеличена в 1,5- 2 раза; расход электроэнергии на покрытие средней толщины составляет 0,5 кВт·ч/дм².

Мягкие покрытия по твердости (1200...3000 МПа), износостойкости и другим свойствам соответствуют углеродистой незакаленной стали. Твердые покрытия по твердости (3000...6500 МПа) и износостойкости приближаются к закаленной стали, а при твердости свыше 6500 МПа в большинстве случаев превышают ее. Прочность сцепления твердого электролитического железа со сталью и чугуном, достигая 450-500 МПа (на порядок выше, чем при напылении), превышает механическую прочность самого покрытия, обеспечивает надежную работу деталей в самых тяжелых условиях эксплуатации - покрытие не отслаивается от основы даже при повреждении и изломе деталей. Электролитические стальные покрытия хорошо хромируются, а мягкие - цементируются и азотируются.

Характеристика электролитического осталивания

В отличие от традиционной технологии осталивание электрическим методом осуществляется при температуре электролита, равной 8...25°C вместо 85...95°C, что делает процесс практически безвредным для обслуживающего персонала и окружающей среды. Кроме того, для футеровки гальванических ванн можно использовать полиэтиленовую пленку вместо дефицитной и дорогой базальтовой плитки.

Процесс осталивания крупногабаритных деталей, включая их отверстия, можно осуществлять вневанными способом с использованием простых приспособлений, которые для наружных поверхностей можно сделать универсальными (рис. 5.64).

Твердое осталивание по современным технологиям с использованием асимметричного переменного тока экономически целесообразно не только на крупных ремонтных заводах, но и в условиях мелких ремонтных мастерских.

Дополнительно разработан новый метод нанесения сплава никель-фосфор. Сплав никель-фосфор является одним из наиболее перспективных сплавов, который в ближайшем времени может заменить хромирование с лучшими технико-экономическими, физико-механическими, эксплуатационными свойствами и минимальным ущербом для окружающей среды.

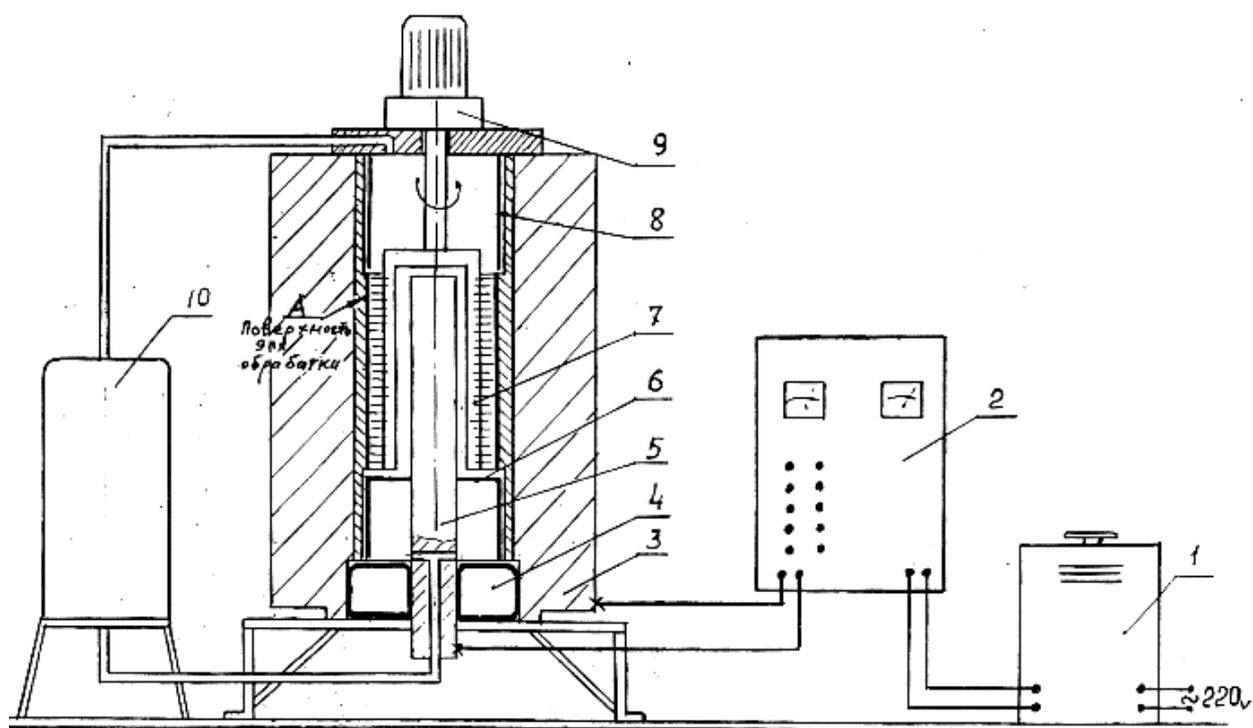
Твердость никель-фосфорных (н-ф) покрытий не уступает твердости хромовых покрытий и не изменяется в отличие от хрома при высоких температурах; коэффициент трения на 30% ниже, чем у хромовых; скорость осаждения составляет 0,07...0,1 мм/ч, в то время как для хромовых покрытий она равна 0,02...0,03 мм/ч.

Твердые покрытия (3000 -6500 МПа) рекомендуются:

Для наращивания до номинальных или ремонтных размеров рабочих поверхностей трения стальных и чугунных деталей различного размера и конфигурации.

Для наращивания посадочных поверхностей шеек валов и осей, гнезд подшипников, корпусов и других деталей под шариковые и роликовые подшипники.

Для наращивания конусных посадочных поверхностей валов и отверстий в конусных соединениях.



Р и с. 5.64. Схема установки для восстановления изношенных цилиндров вне ванны:
 1 - источник питания; 2 – пульт управления; 3 - рубашка гильзы 6; 4 - нижняя камера электролазера; 5 - анод; 7 - вращающаяся щетка от привода 9; 8 - защитное покрытие; 10 - емкость и механизмы проточного электролита

Для наращивания посадочных поверхностей шариковых и роликовых подшипников.

Мягкие покрытия (1200...3000 МПа) рекомендуются для наращивания ответственных деталей с невысокой поверхностной твердостью; наращивания наружных поверхностей бронзовых втулок при ослаблении их посадки в отверстиях, а также при износе втулок по внутренней поверхности; нанесения покрытий с целью повышения прочности сцепления баббита с чугунными подшипниками; ремонта ответственных деталей осталиванием с последующей химико-термической обработкой. После восстановления изношенной поверхности производится её специальная ресурсоповышающая обработка.

Основные элементы ресурсоповышающих мероприятий:

К основным элементам ресурсоповышающих мероприятий относятся следующие:

- механическая обработка поверхности (гильзы цилиндра, поршня и др.);
- упрочняющая обработка рабочих поверхностей с нанесением пластичных покрытий;
- образование частично регулярного микрорельефа по покрытию на цилиндрах методом виброупрочнения;

образование гексанального рельефа на направляющих кольцах и поршне методом упрочняющего деформационного формоизменения;

обкатка цилиндрических пар с использованием ресурсоповышающей присадки к моторным маслам "Стойкость".

Технологический маршрут обработки представлен на рис. 5.65.

Нанесение покрытий из пластичных металлов:

обкатывание с заданным проскальзыванием накатника из материала покрытия (рис. 5.65,а);

при обработке быстровращающейся металлической щеткой (рис. 5.65,б) (одновременное нанесение покрытия и упрочнение). Операция производится после тонкой расточки или зенкерования;

образование частично регулярного микрорельефа поверх покрытия из пластичного металла (рис. 5.65,в). Обеспечивается маслосъемный рельеф поверхности взамен хонингования;

фрагмент рельефа на поверхности поршня при УДФ (рис. 5.65,г).

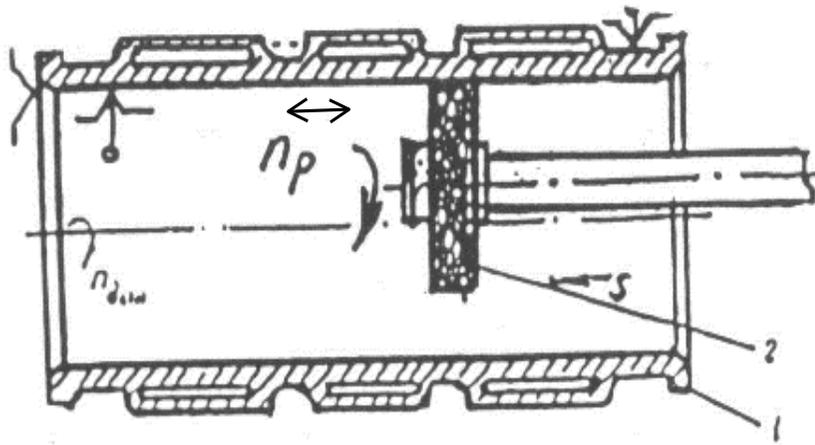
Таблица 5.28.

Результаты испытаний

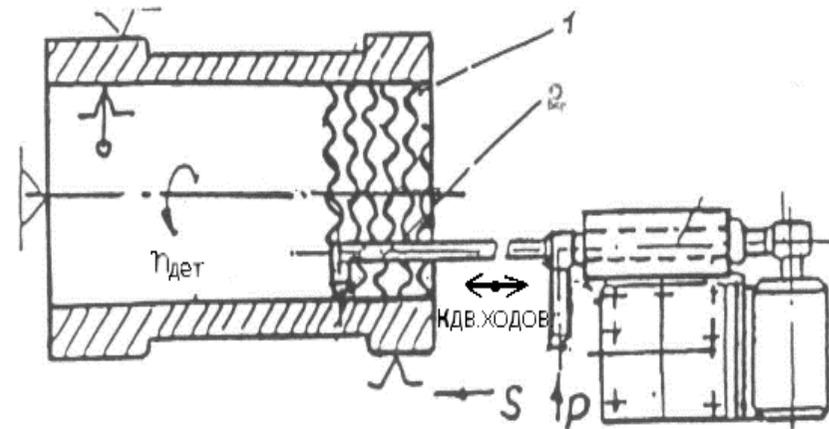
№ п/п	Объекты	Результаты
1.	Газомоторные компрессоры: "Оренбурггазпром", "Югтрансгаз", "Лентрансгаз"	1. Увеличение ресурса цилиндров и поршней за счет повышения износостойкости в 1,8-2 раза. 2. Сокращение времени приработки на 25-30%. 3. Снижение расхода топлива до 5%.
2.	Двигатели КАМАЗ г. Н.Челны) автопредприятия г. Самары 1990 г.	1. Ликвидация задиров и натиров на цилиндрах, прижога в поршневых кольцах. 2. Уменьшение износов ЦПГ до 25%. 3. Сокращение времени обкатки на 30%.
3.	Замки лопаток трубокомпрессоров ГТД ИЛ-86	Полностью исключена фреттинг-коррозия.

Полезность обкатки в карбофторидсодержащем масле освещена ранее в разделе о смазочных материалах.

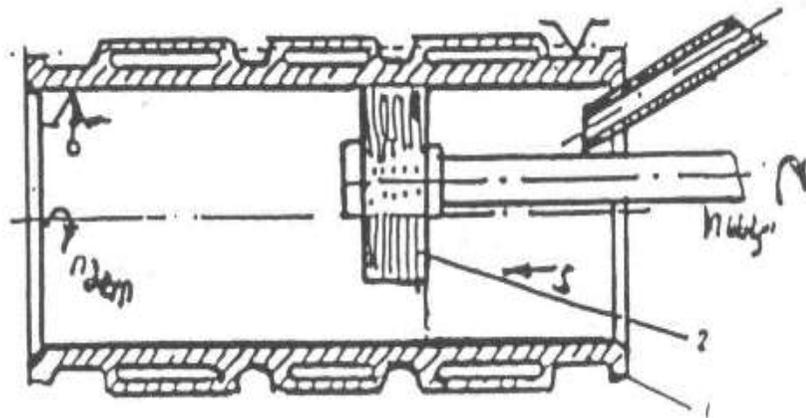
Технология опробована на газомоторных компрессорах типа МК-8, МК-10ГКМ, на автомобильных двигателях ЗИЛ, КАМАЗ и др. Результаты испытаний приведены в таблице 5.28.



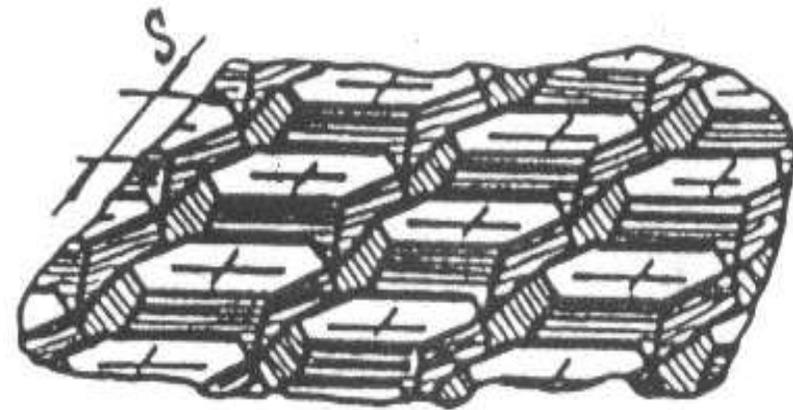
а



в



б



г

Р и с. 5.65. Ресурсоповышающая технология обработки поверхностей цилиндров и поршней:
 а – обкатывание с заданным проскальзыванием накатника из материала покрытия; б - при обработке быстровращающейся металлической щеткой (одновременное нанесение покрытия и упрочнение); в – образование частично регулярного микрорельефа поверх покрытия из пластичного металла; г - фрагмент рельефа на поверхности поршня при УДФ

1.29. 5.6. Обеспечение надежности узлов трения транспортных машин в эксплуатации

Система обеспечения надежности

Обеспечение эксплуатационной надежности автомобилей путем исключения быстронаступаемых отказов и неисправностей осуществляется системой технического обслуживания и ремонта.

Принципиальными положениями такой системы являются: обязательное выполнение постоянного комплекса работ по техническому обслуживанию через установленный период (в километрах пробега); выполнение ремонта автомобиля (агрегата) по потребности, которая определяется техническим осмотром после установленного межремонтного пробега или выявляется в процессе ТО.

Принятая система ТО и ремонта в автопредприятиях России базируется на "Положении о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта".

Положением предусматриваются: ежедневное техническое обслуживание (ЕО), первое техническое обслуживание (ТО-1), второе техническое обслуживание (ТО-2), сезонное обслуживание (СО). Эти виды обслуживания отличаются между собой периодичностью (табл. 5.29) перечнем и трудоемкостью выполняемых работ.

Таблица 5.29.

Периодичность ТО автомобилей для 1-й категории условий эксплуатации

Типы автомобилей	Периодичность ТО, км	
	ТО-1	ТО-2
Легковые автомобили и автобусы.	3500, 2600	14000
Грузовые автомобили и автобусы на базе грузовых автомобилей	2 200	13000, 11 000

Для грузовых автомобилей Горьковского автомобильного завода периодичность ТО-1 составляет 2000 км., а ТО-2 - 10000 км. Периодичность ТО согласно второй нормативной части Положения устанавливается для автомобилей: ГАЗ-53, семейств МАЗ-500 и ЗИЛ-130— 2500 (ТО-1) и 12 500 км (ТО-2). КамАЗ соответственно 4000 и 18000 км.; ГАЗ-24 — 4000 и 16000 км; автобусов ЛиАЗ-677 -2800 и 14000 км. ПАЗ-672 — 2400 и 12000 км.

ЕО выполняется ежедневно после работы автомобиля на линии и включает контрольно-осмотровые работы по механизмам управления, приборам освещения, кузову, кабине, уборочно-моечные и обтирочные операции или сушку, а также заправку топливом, маслом, сжатым воздухом и охлаждающей жидкостью. Мойка автомобиля производится по потребности в зависимости от погодных и климатических условий, также от санитарных и эстетических требований.

ТО-1 заключается в наружном техническом осмотре всего автомобиля и выполнении в установленном объеме контрольно-диагностических, крепежных, регулировочных, смазочных, электротехнических работ, проверке работы двигателя, рулевого управления, тормозов и других механизмов, проведении заправочных работ.

ТО-2 включает углубленную диагностику технического состояния всех агрегатов, механизмов и приборов автомобиля, выполнение в установленном объеме крепежных, регулировочных, смазочных и других работ, а также проверку действия агрегатов, механизмов и приборов в работе.

СО предусматривает подготовку подвижного состава к эксплуатации в холодное и теплое время года, проводится 2 раза в год и обычно совмещается с ТО-2 или ТО-1.

Текущим ремонтом (ТР) автомобиля (агрегата) называется устранение отказов и неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации или выявленных в процессе ТО, способствующее выполнению установленных норм пробега автомобиля до капитального ремонта.

Капитальным ремонтом называется восстановление автомобиля (агрегата), полностью потерявшего свою работоспособность.

ТР производится по потребности и, как правило, в межсменное время. Необходимость его устанавливается в результате осмотра автомобиля после возвращения с линии или его технического обслуживания, а также в процессе работы на линии. ТР выполняется путем проведения разборочных, слесарных, сварочных и других работ, а также посредством замены агрегатов, отдельных узлов и деталей.

В зависимости от фактической периодичности выполнения ТР и его трудоемкости часто повторяющиеся операции могут регламентироваться, т. е. входить в обязательный перечень работ (предупредительный ремонт). Этот вид ремонта может выполняться отдельно от ТО со средней фактической периодичностью или совместно с ТО (сопутствующий текущий ремонт).

Для повышения объективности оценки технического состояния автомобилей, проходящих ТО и ремонт, и улучшения процесса управления ими служит диагностирование автомобилей. Диагностирование автомобилей на АТП является составной частью процесса ТО и ремонта и важным элементом системы, предусмотренной Положением. Положением о техническом обслуживании и Руководством по диагностике предусматриваются два основных вида диагностирования: общее и поэлементное.

Общее диагностирование (Д-1) предназначается для контроля механизмов, обеспечивающих безопасность движения автомобиля, выполняется с периодичностью ТО-1 и производится либо перед, либо совместно с ТО-1.

Поэлементное или углубленное диагностирование (Д-2) выполняется перед ТО-2 и ТР, предназначается для выявления скрытых неисправностей агрегатов и узлов автомобиля, их причин и характера, устранение которых требует выполнения ремонтных и регулировочных работ большой трудоемкости. Д-2 выполняется за 1-2 дня до ТО-2, что позволяет подготовить производство к выполнению ТР.

После выполнения ТО-2, если проводятся ремонтные работы по тормозам и переднему мосту, автомобили для контроля направляются на посты Д-1.

Понятие о диагностике. Под диагностикой автомобиля (агрегата, механизма) понимается определение его технического состояния с целью выявления неисправностей, причин их возникновения и установления безотказного срока службы (прогнозирования). При диагностировании применяются методы и средства, позволяющие по внешним признакам (температуре, шуму, вибрации, прорыву газа, расходу, топлива и др.) определять техническое состояние и работоспособность агрегатов и механизмов.

Процесс диагностирования включает следующие этапы: 1 — измерение диагностического параметра, характеризующего техническое состояние (агрегата, механизма); 2 — сравнение замеренного значения диагностического параметра с нормативной (или предельной) величиной; 3 — составление заключения о техническом состоянии механизма; 4 — определение срока службы до предельного состояния или остаточного ресурса работы (прогнозирование).

Параметры технического состояния. Под *параметром* понимается качественная и количественная мера, характеризующая состояние системы, механизма, элемента и процесса в целом.

Различают структурные и диагностические параметры.

Под структурными параметрами механизма понимают физические величины (зазор в сопряжении, температура, электрическое напряжение, мощность и другие, измеряемые соответственно в миллиметрах, градусах, вольтах и т. д.), характеризующие связь и взаимодействие между элементами механизма, его работоспособность и служебные свойства. Так, например, техническое состояние сопряжения вал-подшипник определяется зазором между ними, его формой и их размерами, определяющими, в свою очередь, конусность, овальность и другие параметры.

Поскольку возможность прямого изменения структурных параметров бывает ограничена, при диагностировании, как правило, используются внешние (косвенные) признаки, сопутствующие процессу функционирования механизма (например, тепловое состояние, расход и состав масла, вибрация и др.). Указанные признаки несут необходимую информацию о техническом состоянии механизма и называются диагностическими. Количественное значение диагностического признака называется диагностическим параметром. Например, эффективность тормозов можно оценить по тормозному пути или замедлению автомобиля (отрицательному ускорению); двигателя — по эффективной мощности и так далее, что и будет являться диагностическими параметрами.

Структурные и диагностические параметры могут иметь номинальное, допустимое и предельное значения. Номинальное значение параметра соответствует состоянию нового или капитально отремонтированного механизма после приработки и устанавливается технической документацией автомобильных заводов. Допустимое (упреждающее) значение параметра соответствует состоянию механизма, при котором (по результатам контроля) его дальнейшая эксплуатация возможна и допустима без восстановления до следующего контроля. Для уменьшения ве-

роятности отказа или увеличения длительности исправной работы автомобиля это значение устанавливается расчетным путем, исходя из минимума суммарных удельных затрат (на 1 км) на устранение отказа (неисправности). Предельное значение параметра соответствует такому состоянию механизма, при котором дальнейшая его эксплуатация недопустима. Предельные значения устанавливаются автомобильными заводами или в результате специальных исследований научными организациями в процессе эксплуатации представительной группы автомобилей.

Прогнозирование исправной работы. Под прогнозированием при диагностировании автомобиля или его механизмов понимается определение срока их исправной работы (пробега) до предельного состояния, установленного технической документацией, или до списания. Кроме того, прогнозирование включает и определение возможности безотказной работы автомобиля (механизма) в пределах установленной периодичности ТО.

В первом случае определяется остаточный ресурс работы автомобиля (или механизма) при установлении срока постановки в капитальный ремонт или списания, во втором случае - возможность исправной работы автомобиля до очередного ТО или в период предстоящего пробега.

Сравнивая фактическое значение диагностического параметра с допустимым, можно судить о работоспособности автомобиля в период предстоящего пробега и необходимости профилактических воздействий. Сопоставляя же фактическое значение параметра, измеренное в данный момент, с предельным, можно определить его ресурс, а с номинальным - израсходованный ресурс.

На основании опыта диагностирования основных узлов трения двигателей транспортных машин можно отметить, что различными диагностическими средствами оценивают следующие параметры: неплотность цилиндро-поршневой группы, давление масла, текущее значение мощности (в отношении к номинальной) и др., которые интерпретируются как характеристики изнашивания. Например, из статистических наблюдений установлено, что износ цилиндровой пары в пределах допустимых значений снижает мощность двигателя на 5-7%; неплотность вызывает снижение мощности до 10%. Весьма информативной является вибродиагностика, которая позволяет оценить состояние подшипников и других узлов трения.

Особую роль играет диагностирование такого узла трения, как тормозная система. В нашей стране перечень параметров диагностирования тормозов определен ГОСТ 26048-83.

Эти параметры делятся на две группы: первая определяет работоспособность тормозных систем, вторая - дополнительные параметры для поиска неисправностей в отдельных частях и устройствах тормозных систем.

В первую группу параметров входят тормозной путь автомобиля и колеса, отклонение от коридора движения, установившаяся тормозная сила автомобиля и колеса, удельная тормозная сила, уклон дороги (на котором удерживается автомобиль в заторможенном состоянии), коэффициент неравномерности торможения сил колес оси, осевой коэффициент распределения тормозной силы, время сраба-

тывания (и растормаживания) тормозного привода, давление и скорость изменения его в контурах тормозного привода и др.

Во вторую группу входят полный и свободный ход тормозной педали, уровень тормозной жидкости в резервуаре, сила сопротивления вращению незаторможенного колеса, путь и замедление выбега колеса, овальность и толщина стенки тормозного барабана, деформации стенки тормозного барабана, биение тормозного диска, толщина тормозной накладки, ход штока тормозного цилиндра, зазор в фрикционной паре, давление в приводе, при котором колодки касаются барабана, и др.

Из числа этих параметров в соответствии с ГОСТ 25478—82 при стендовых испытаниях тормозов обязательно определяются тормозные силы на отдельных колесах, общая удельная тормозная сила, коэффициент осевой неравномерности тормозных сил, время срабатывания тормозов. При этом показатели общей удельной тормозной силы и коэффициент осевой неравномерности являются расчетными.

При дорожных испытаниях тормозов задаются исходные скорость передвижения автомобиля и усилие нажатия на тормозную педаль; измеряемыми являются тормозной путь или установившееся замедление и время срабатывания тормозного привода.

Наиболее распространены на АТП и СТО стенды, работающие с использованием сил сцепления колеса с опорной поверхностью, однако в большинстве из них невозможно реализовать полный тормозной момент автомобиля, так как величина реализуемого тормозного момента ограничена силой сцепления колеса с опорной поверхностью стенда.

В стендах, работающих без использования сил сцепления колеса с опорной поверхностью, тормозной момент передается непосредственно через колесо или ступицу автомобиля. Эти стенды широкого распространения не получили в основном из-за сложности конструкции.

По режиму движения колеса силовые стенды классифицируются на два типа: с частичным проворачиванием колеса и с постоянным вращением колеса. К стендам первого типа относятся силовые платформенные стенды, остальные стенды относятся ко второму типу.

Силовые платформенные стенды

В силовых платформенных стендах колеса неподвижны, поэтому при нажатии на тормозную педаль автомобиля измеряется лишь усилие сдвига (срыва) заблокированных колес с места, т. е. сила трения между тормозными накладками и барабаном (диском). Существуют стенды с одной общей площадкой под все колеса и с площадками под каждое колесо автомобиля. Силовые платформенные стенды обладают целым рядом существенных недостатков, исключающих их широкое применение, например, в них не учитываются влияние скорости движения на коэффициент трения скольжения и динамическое воздействие на тормозную систему. Результаты измерений во многом зависят от ее стояния опорной поверхности

и протекторов колес, измеряется лишь усилие страгивания с места. Результаты измерения во многом зависят от положения колес.

Платформенные инерционные стенды, имеющие подвижные (одну общую или под каждое колесо) площадки, по сравнению силовыми платформенными стендами более совершенны. Автомобиль въезжает на стенд с заданной скоростью, и в момент установки колес на площадки производится резкое торможение; перемещение площадок от возникшей силы инерции характеризует состояние тормозной системы автомобиля. К существенным недостаткам стендов такого типа относятся, например, потребность в территории для разгона автомобиля, снижение уровня безопасности работ при диагностировании, точность и достоверность диагностической информации и др.

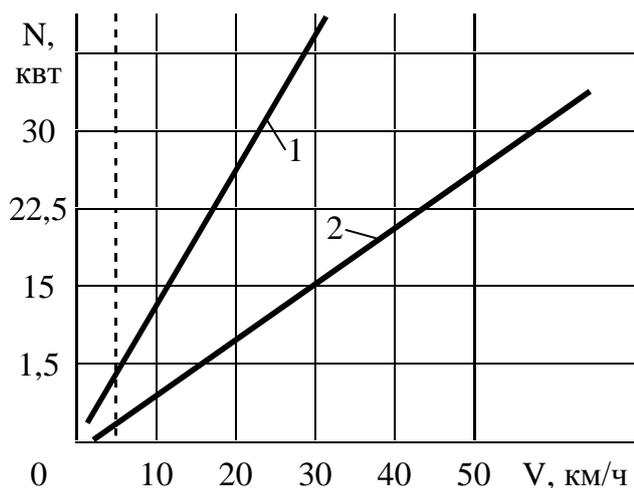
Инерционные нагрузочные ленточные стенды воспроизводят дорожные условия взаимодействия шины с опорными поверхностями. Однако они громоздки, не обеспечивают достаточную устойчивость автомобиля при диагностировании. Кроме того, в стенде наблюдаются большие потери на трение, имеет место проскальзывание ленты относительно барабанов.

Наиболее распространены силовые роликовые и инерционные роликовые стенды. Силовой метод позволяет определять тормозные силы каждого колеса при задаваемом усилии нажатия на педаль, время срабатывания тормозного привода, оценивать состояние рабочих поверхностей тормозных накладок и барабана, эллипсность барабанов и т. п. Более 90% эксплуатирующихся в России и за рубежом тормозных стендов основаны на силовом методе. Однако исследования показали, что при очень малых скоростях (менее 5...7 км/ч для гидропривода и 2...3 км/ч для пневмопривода) создаваемые на стендах тормозные силы больше реальных, получаемых в дорожных условиях. С ростом скорости достоверность диагностирования этого параметра возрастает. Однако при этом возрастают мощности приводных электродвигателей (рис. 5.66) и стоимость стенда (рис. 5.67).

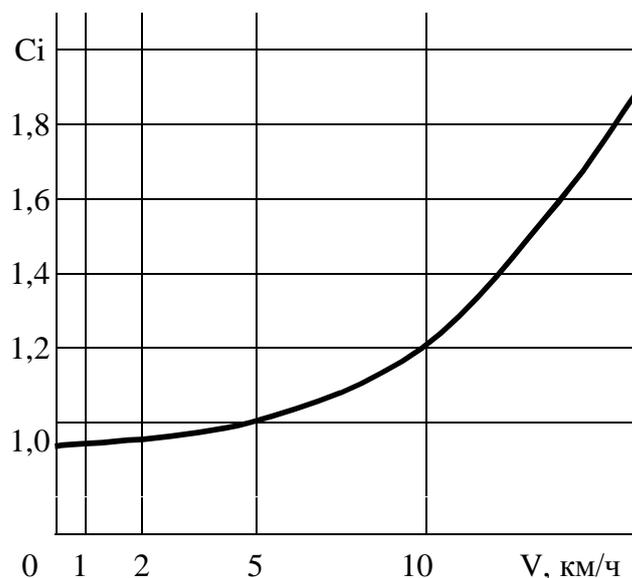
Более совершенным является метод испытаний на инерционных роликовых стендах. На этих стендах измеряются тормозной путь колес (по каждому в отдельности), максимальное замедление и время срабатывания тормозного привода. К основным преимуществам этих стендов относятся приближение режимов испытаний тормозов к реальным эксплуатационным условиям и повышенные точность и достоверность диагностической информации. Однако большинство недостатков, присущих силовым стендам, характерны и для инерционных.

Выбор средств технического диагностирования (СТД) для АТП и СТО осуществляется из условий снижения затрат на их производство и эксплуатацию. При этом одним из основных условий является получение достаточно полной информации о техническом состоянии тормозной системы автомобиля. Выбор средств технического диагностирования тормозов (СТДТ) должен базироваться на требованиях назначения, эксплуатации и производства.

Основной частью стенда является опорное устройство, в которое должны входить следующие механизмы: блок роликов; страховочные устройства; подъемник колес или другие вспомогательные устройства для обеспечения самостоятельного выезда автомобиля со стенда; устройство сигнализации о блокировке колес или



Р и с. 5.66. Зависимость мощности приводных электродвигателей стенда от скорости автомобиля v :
 1 - при нагрузке на колесо 4903 Н;
 2 - при 1962 Н



Р и с. 5.67. Зависимость относительной стоимости стенда C от скорости автомобиля (за единицу принята стоимость стенда со скоростью $v = 4$ км/ч)

другие устройства для предотвращения повышенного износа шин при испытании на стенде; инерционные массы (для инерционных стендов); приводное устройство, обеспечивающее разгон колес до заданной скорости (на инерционных стендах) или проворачивание заторможенных колес с определенной скоростью (на силовых стендах) (см. рис. 5.66).

Блок роликов должен обеспечивать статическую и динамическую устойчивость автомобиля на стенде; возможность реализации тормозной силы в пределах не менее 50% нормативного значения (ГОСТ 25478-82). Диаметр роликов инерционных стендов должен быть равен не менее 0,8 динамического радиуса колеса, а силовых стендов - не менее 200 мм для легковых и 250 мм для грузовых автомобилей. Поверхность роликов инерционных стендов должна быть гладкой, а силовых стендов - с шероховатостью высотой 2—5 мм. Ролики силовых стендов целесообразно подвергать специальной обработке для увеличения коэффициента сцепления и реализуемой тормозной силы при испытаниях автомобиля с сухими или мокрыми шинами.

Приводное устройство инерционного стенда должно создавать крутящий момент, достаточный для разгона роликов и колес автомобиля до скорости проверки начала торможения, предусмотренной конструкцией стенда и отвечающей требованиям ГОСТ 25 478—82 (не ниже 40 км/ч). Для соединения приводного устройства с роликами стенда не рекомендуется использовать передачи, допускающие проскальзывание.

Приводное устройство силового стенда должно обеспечивать прокручивание заторможенного колеса со скоростью не ниже 2 км/ч. Такая скорость достаточна для тормозов с малой чувствительностью к изменению коэффициента трения

нажатия на педаль и включается система измерения и записи результатов. При той же установке автомобиля проверяют работу стояночного тормоза. Для этого предварительно заторможенные стояночным тормозом задние колеса проворачивают со скоростью до 15 км/ч электродвигателем 1. При этом прилагаемую к колесам силу измеряют с помощью датчика 17.

Автоматизированные системы контроля тормоза. В зарубежной и отечественной практике все большее внимание уделяют автоматизации процесса диагностирования тормозных систем автомобилей. Принцип построения автоматизированной системы контроля технического состояния систем и агрегатов автомобиля (в том числе тормозов) заключается в том, что измерение каждого параметра должно производиться автоматически единым многоканальным цифровым измерительным прибором, а весь комплекс испытаний должен осуществляться по принципу дистанционного программного управления по заранее установленному алгоритму с выносного микропульта. При этом должна быть обеспечена возможность повторного измерения контролируемого параметра, а также выборочного контроля любой функциональной системы, влияющей на активную безопасность.

Методы и средства диагностирования рулевого управления и элементов передней подвески.

Система рулевого управления должна удерживать автомобиль в направлении движения по прямой, обеспечивать качение управляемых колес без скольжения во время поворота и автоматически возвращать их в положение прямолинейного движения.

В соответствии с требованиями ГОСТ 25478—82 диагностирование рулевого управления осуществляется по суммарному люфту и общей силе трения (усилию, необходимому для поворота рулевого колеса). Проверка состояния рулевого управления автомобилей на СТО и АТП осуществляется, например, приборами К-187 и К-405. Прибор К-187 переносного типа включает в себя динамометр со шкалой и люфтомер, который крепится на рулевом колесе. Стрелка люфтомера крепится на рулевой колонке. Прибор обеспечивает измерение усилия в диапазоне 0.. 80 Н и суммарного люфта в диапазоне 0.. 15°.

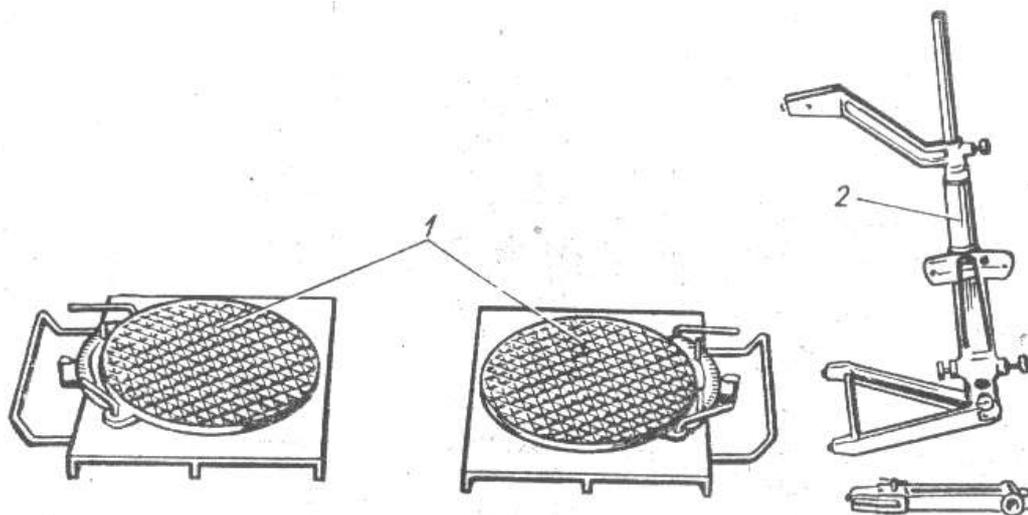
Для проверки гидравлического усилителя и насоса рулевого управления (применительно к автомобилям ЗИЛ) применяется переносной прибор К-405. Прибор включает гидравлический блок и электроимпульсный тахометр. В гидравлический блок входят манометр, дистанционный термометр, объемный расходомер, нагрузочный клапан, реверсивный золотник и демпфер для гашения колебаний давления в жидкости. Электронно-импульсный тахометр служит для измерения частоты вращения вала насоса гидроусилителя (сигнал, пропорциональный частоте вращения вала насоса гидроусилителя, снимается с контактов прерывателя диагностируемого автомобиля). Прибор обеспечивает измерение давления в диапазоне 0...10 МПа, температуры 0...120°С, объема рабочей жидкости 0.. 10 л, углового перемещения —45.. 0.. 45°.

Установка управляемых колес грузовых автомобилей проверяется в основном по параметру их схождения. На АТП для этих целей используются линейки моделей 2182 и К.463.

Для проверки технического состояния передней подвески (переднего моста) грузовых автомобилей ЗИЛ и ГАЗ широко применяется стенд КИ-4872 (конструкции ГосНИТИ) с беговыми барабанами. На стенде измеряются боковые силы в контакте колеса с барабаном стенда. Для проверки технического состояния переднего моста автомобилей с нагрузкой на ось не более 10000 Н используется аналогичный стенд модели КИ-8945.

Проверка углов установки колес легковых автомобилей осуществляется на площадочных стендах и в основном на оптических и электрооптических стендах. К числу первых относятся отечественные стенды К-112, Тестос-1 и ВЕМ-682 фирмы Бем-Мюллер (Франция) К числу вторых—отечественные стенды К-111, 1119М, а также стенды Польского производства РКО-1, РКО-4, РК-1 и др.

Характерно устройство стенда РК-1, которое обеспечивает измерение углов развала колес, продольного к поперечного наклона шкворней, поворота колес легковых, грузовых автомобилей и автобусов. Стенд (рис. 5.69) включает два поворотных диска 1 под передние колеса автомобиля; две подставки под задние колеса для выверки автомобиля по уровню, измерительный прибор 2. Измерительный прибор состоит из круглой штанги, на которой установлены два опорных плеча и корпус. Верхним подвижным одинарным плечом устанавливается размер, соответствующий ободу колеса диагностируемого автомобиля. Этим плечом прибор крепится к колесу автомобиля. Нижнее двойное опорное плечо неподвижное. Корпус прибора установлен на штанге между опорными плечами и имеет две угловые шкалы и стрелку с уровнем. Одна из шкал и стрелка крепятся таким образом, чтобы возможно было их отклонение на определенный угол по отношению к оси штанги прибора. Корпус может поворачиваться вокруг штанги и фиксироваться в двух положениях, в которых шкала перпендикулярна или параллельна плоскости колеса.



Р и с. 5.69. Стенд РК-1

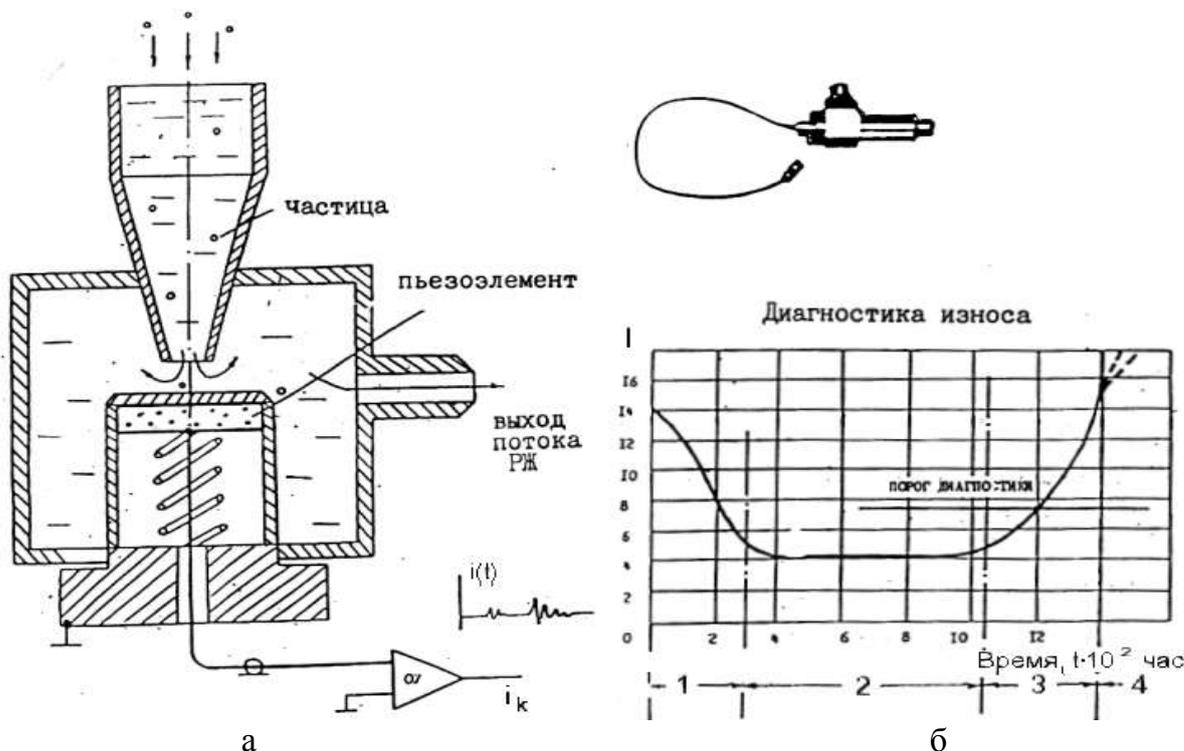
Стенд обеспечивает проверку углов установки колес с диаметром дисков 12" ... 22". Диапазоны измерения углов развала: $-5^{\circ} \dots +5^{\circ}$ углов продольного и поперечного наклона шкворней; $-15^{\circ} \dots +15^{\circ}$ углов поворота колес $-40^{\circ} \dots +40^{\circ}$. Пользоваться стендом можно только на тщательно выверенной горизонтальной площадке.

В целом развитие диагностирования автомобилей происходит по двум основным направлениям: стационарное и встроенное (бортовой контроль). Находит применение комбинированный способ диагностирования с помощью системы встроенных датчиков контрольных точек и встроенных в конструкцию автомобилей вторичных измерительных приборов.

В общем случае для диагностики изнашивания (трибодиагностики) может быть привлечен широкий круг различных методов анализа, упоминаемых в табл. 5.30.

Большинство из указанных в табл. 5.30 методов являются лабораторными. В последние годы определилась тенденция вести диагностирование непрерывно, для чего транспортные машины оснащают средствами встроенного контроля, например с помощью датчиков, контролирующих количество и размеры частиц износа, выделяемых из потока масла.

На рис. 5.70. приведены схема и общий вид такого датчика, разработанного в Самарском аэрокосмическом университете под руководством проф. Логвинова Л.М.



Р и с. 5.70. Встроенная схема непрерывного диагностирования:

- а – схема устройства пьезоэлектрического датчика (каждая частица пропорционально своей массе рождает импульс i_k); б - характерные результаты диагностирования;
- 1 – зона приработки; 2 – зона установившегося режима изнашивания; 3 – переход к разрушению;
- 4 – критическая зона; J – интенсивность потока частиц, $J = \varphi(m, n)$ – массы и числа частиц

Методы трибодиагностики

Методы анализа	Регистрируемые характеристики			
	Состав частиц	Концентрация частиц в среде	Фракционный состав	Загрязненность среды
1	2	3	4	5
<i>Физические:</i>				
Эмиссионная спектрофотометрия	+	+	-	-
Атомно-абсорбционная спектрометрия	+	+*	-	-
Атомно-флуоресцентная спектрофотометрия	+	+	-	-
ИК и УФ –спектроскопия	-	-	-	+
Адсорбционная спектрофотометрия	-	+	-	+
Прямое фотометрирование	-	-	-	+
Электрооптический метод	-	+	-	-
Микроскопия	-	+	+	-
Светорассеяние	-	+	-	-
Поточная ультрамикроскопия	-	+	+	-
Феррография	+***	+	+	-
Магнитометрия	-	+***	-	-
Метод ядерного магнитного резонанса	-	+***	-	-
Нейтронно-активационный анализ	-	+	-	-
Акустический анализ	-	-	+	-
<i>Физико - химические:</i>				
Сендиментометрия	-	+	+	-
Полярография	+	+	-	-
Плотнометрия	-	-	-	+

* Для частиц размером менее 10 мкм.

** Использование бихроматического микроскопа позволяет определить наличие окислов.

*** Концентрация ферромагнитных частиц.

Как видно из рисунка, частицы в зависимости от своих размеров вызывают импульсы, генерируемые пьезоэлементом. В приборной части эти импульсы анализируются, учитываются и классифицируются по размерным группам.

Бортовые системы трибодиагностики рекомендуются как одна из составляющих внедрения комплексной системы диагностирования сложных агрегатов (газоперекачивающих установок, дизелей и электроагрегатов тепловозов железнодорожного транспорта, оборудования тепловых и гидравлических станций, пассажирских автобусов и др.), что позволяет применять прогрессивную систему эксплуатации оборудования по фактическому состоянию.

Приборная часть системы трибодиагностики разработана в Самарском аэрокосмическом университете и представляет собой совокупность устройств, позволяющих по результатам дисперсионного анализа частиц износа в потоке масла

оценивать все этапы жизнедеятельности узлов трения начиная от зарождения и развития дефектов до наступления аварийно-опасных ситуаций.

Система «ФОТОН» позволяет:

контролировать уровень загрязнения рабочих жидкостей;

поддерживать чистоту рабочих жидкостей на заданном уровне;

диагностировать состояние износа узлов трения;

контролировать уровень оводнения и диагностировать состояние теплообмена;

автоматически отключать дополнительные блоки очистки;

автоматически отключать насосную станцию, блокировать подачу жидкостей и др.

Устройства системы защищены Патентами РФ и представляют собой новую ступень в технике эксплуатации, обслуживания и ремонта транспортных машин.

1.30. 5.7. Новая техника для промывки деталей узлов трения

В сборочном и ремонтном производстве одним из условий обеспечения качества и ресурса собираемых узлов трения является обязательная промывка деталей.

Удалению подлежат не только промышленная грязь (жиры, пыль, нагар и т.д.), но и твердые частицы, которые шаржируются в поверхности трения подшипников и других деталей при их обработке абразивным инструментом. Такие частицы при трении образуют царапины и вмятины на контактирующих поверхностях, а после отделения попадают в масло и вызывают абразивное изнашивание.

Известен единственный эффективный метод, позволяющий обеспечить качественную промывку, - применение акустического возбуждения моющей среды. Для этого обычно используется ультразвук. Под действием ультразвука в жидкости возникает кавитация, а кавитационные пузырьки, "взрываясь" у поверхности деталей, создают ударные волны и производят очистку поверхностей.

Проблема состоит в дороговизне мощных ультразвуковых установок, их сложности и вредности ультразвукового воздействия на оператора, кроме того ультразвук затухает в отверстиях, и удаленные полости остаются непромытыми. Поэтому в истории акустических технологий предпринимались многочисленные попытки возбудить кавитацию в моющих установках без ультразвука. Однако, несмотря на полученные эффекты, акустические технологии до сих пор не нашли широкого применения. Основной причиной этого являлось отсутствие эффективных промышленных приводных механизмов возбуждения жидкостей с заданными частотами, силовыми и амплитудными характеристиками. Создать такой частотный мультипликатор, отвечающий требованиям акустических технологий, позволяющий создавать промышленные установки различного назначения, удалось в Самарском техническом университете (разработчики Д.Г. Громаковский, В.П. Малышев, А.Г. Ковшов и др.). Схема мультипликатора приведена на рис. 5.71.

В качестве первых промышленных образцов гидроволновых установок (ГВУ) для акустических технологий создано семейство установок "Кавитон", предназначенных для промывки деталей перед сборкой новых машин и при производстве

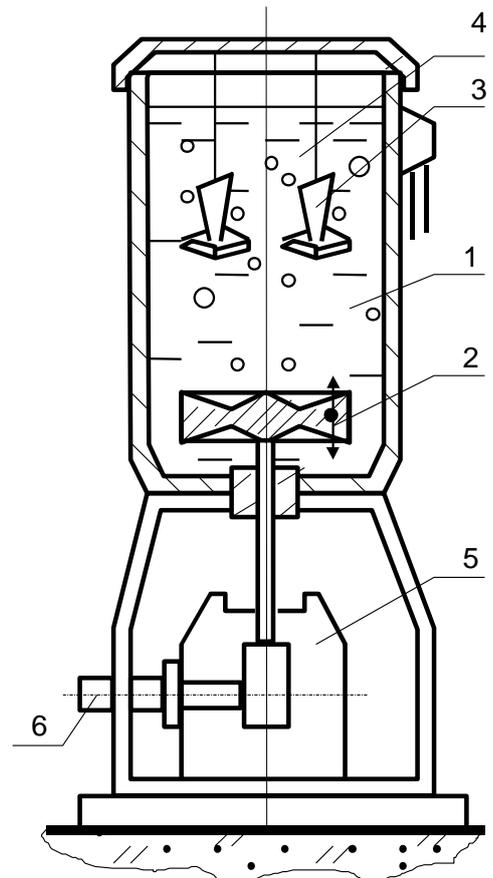
ремонтных работ. На этих машинах отработана промывка сетчатых пакетов фильтроэлементов маслосистемы, подшипников, топливной, гидравлической аппаратуры и др.

ГВУ (см.рис. 5.71) содержит ванну цилиндрической формы 1 и диск-активатор 2. Ванну заполняют технической водой с температурой $T=20^{\circ}\text{C}$. Очищаемые детали 3 размещают в рабочей зоне ванны 4, затем включают привод пульсации давления 5, который сообщает диску линейные возвратно-поступательные перемещения, и производят промывку.

Эффективная промывка на ГВУ происходит в резонансном режиме рабочего процесса, при котором частота движений активатора 2 соответствует собственной частоте столба моющей жидкости. Настройку осуществляют путем плавного изменения частоты вращения приводного двигателя постоянного тока 6, вращающего многовершинный кулачок пульсационного привода.

Приведенными выше примерами научно-технических разработок, направленных на обеспечение высокой долговечности и надежности узлов трения транспортных машин, авторы заканчивают обзор проблемы изнашивания при трении.

1.31.



Р и с. 5.69. Схема гидроволновой установки "Кавитон" для промывки деталей

1.32. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Основы трибологии/Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Наука и техника, 1995. 778 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
3. Машков Ю.К. Трибология конструкционных материалов. Омск: ОмГТУ, 1996. 299 с.
4. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей/Под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1984. 383 с.
5. Юлмачев Н.П. Устройство и эксплуатация автомобилей. М.: Изд-во ДОСААФ, 1984. 334 с.
6. Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин: Сб.тр. М.: Наука, 1982. 307 с.
7. Трение, изнашивание и смазка: Справочник: В 2 кн/Под ред. И.В. Крагельского. М.: Машиностроение, 1978.
8. Справочник по триботехнике: В 3 т. Т.1. Теоретические основы; Т.2. Смазочные материалы и техника смазки; Т.3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств, методы триботехнических испытаний. М.: Машиностроение. 1989.
9. Технические средства диагностирования: Справочник. М.: Машиностроение, 1989. 672 с.
10. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 327 с.
11. Матвиевский Р.М., Лашхи В.Л., Буяновский И.А., Фукс И.Г., Бадыштова К.М. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник. М.: Машиностроение, 1989. 217 с.
12. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник/Под ред. В.М. Школьникова. М.: Химия, 1989. 432 с.
13. Подшипники качения: Справочник. М.: Машиностроение, 1984. 279 с.
14. Уплотнения и усталостная техника: Справочник/Под ред. А.М. Голубева, Л.А. Кодакова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
15. Конструкционные материалы: Справочник/Под ред. Б.Н. Арзомасова. М.: Машиностроение, 1989. 233 с.
16. Громаковский Д.Г. Повышение износостойкости узлов трения упрочняющим деформационным формоизменением контактирующих поверхностей //Вестн. машиностроения. 1983. № 5.
17. Громаковский Д.Г., Кузнецов Н.Д. и др. Повышение долговечности узлов трения путем применения карбонофторидов//Вестн. Машиностроения, 1987, № 8.
18. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 591 с.
19. Елизаветин М.А., Сатель Л.А. Технологические способы повышения долговечности машин. М.: Машиностроение, 1979. 438 с.
20. Кугларов А.С., Онищук Н.Ю. Свойства и применение металлоплакирующих смазок: Тематический обзор. М.: ЦНИИТЭН, 1985. 60 с.
21. Суранов Г.И. Уменьшение износа авторемонтных двигателей при пуске. М.: Колос, 1982. 143 с.
22. Полимеры в узлах трения машин и приборов/Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.

23. Киршенбаум В. Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. М.: Машиностроение, 1987. 230 с.
24. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В., Кокора А. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1985. 495 с.
25. Буше Н. А., Копытко В. В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981. 233 с.
26. Федорченко И. М., Пугина Л. И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980. 400 с.
27. Футорянский Ю. В. Эффективные методы упрочнения стальных изделий. Куйбышев: Куйбыш. кн. изд-во. 1978. 87 с.
28. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению. М.: Машиностроение, 1969. 244 с.
29. Кутьков А. А. Износостойкие и антифрикционные покрытия. М.: Машиностроение, 1976. 152 с.
30. Белый А. В., Карпенко Г. Д., Мышкин К. Н. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М.: Машиностроение, 1991. 208 с.
31. Трибология: Исследования и приложения: Опыт США и стран СНГ/Под. ред. В. А. Белого, К. Лудемы, Н. К. Мышкина. М.: Нью-Йорк, 1993. 454 с.
32. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения/Под ред. Д. Н. Гаркунова. М.: Машиностроение, 1982. 207 с.
33. Логвинов Л. М. Техническая диагностика жидкостных систем технологического оборудования по параметрам рабочей жидкости. М.: ЦНТИ, 1992. 90 с.
34. Рыжов Э. В., Суслов А. Г., Федоров В. П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.
35. Костецкий Б. И., Колесниченко Н. Ф. Качество поверхности и трение в машинах. Киев: Техника, 1969. 216 с.
36. Хайнике Г. Трибохимия: Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 584 с.

Беркович Иззидор Иосифович
Громаковский Дмитрий Григорьевич

Трибология

Физические основы, механика
и технические приложения

Редактор С.И.Костерина

Технический редактор Г.Н.Шанькова

ЛР № 020595 от 09.07.97.

Подп. в печать 21.07.00

Формат 60x84 1/16. Бум. типогр. № 1.

Печать офсетная.

Усл.п.л. 18, 83. Усл. кр.-отт. 18, 83. Уч. –изд. л. 17, 98.

Тираж экз. С- .

Самарский государственный технический университет
443010. г. Самара, Галактионовская, 141