

УДК 620.179.112 (075,8)

ББК 34.41я73

П25

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор института машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской Академии наук *Павлов В.Г.*,
д-р техн. наук, зав. кафедрой прикладной механики и основ
конструирования Северо-Кавказского государственного
технического университета *Копченков В.Г.*

Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М.

П25 Основы трибологии и триботехники: учеб. пособие. – М: Ма-
шиностроение, 2008. – 206 с.: ил.

ISBN 978-5-217-03437-6

В учебном пособии, в соответствии с программой дисциплины «Основы трибологии», разработанной специалистами Ассоциации инженеров-трибологов России, изложены основные положения контактного взаимодействия твердых тел, свойства и топография их поверхностей, природа и виды внешнего трения, влияние различных факторов на трение. Описаны различные виды изнашивания, роль смазки, температуры, фрикционности и антифрикционности материалов для деталей сопряжений, основные способы повышения износостойкости материалов и деталей машин. Приведены расчетные методы оценки интенсивности изнашивания наиболее часто встречающихся трибосопряжений. Рассматриваются основные положения моделирования трибологических процессов, методы испытания на трение и изнашивание, а также роль трибологии в решении социально-экономических проблем, обусловленных трибологическими источниками: потери от недовыпуска продукции, потери всех видов ресурсов, ухудшение экологичности, энергетической эффективности различных видов транспорта и др.

Пособие рассчитано на студентов технических специальностей, изучающих эту дисциплину или ее разделы в других дисциплинах, аспирантов, научных и инженерно-технических специалистов в области трения, износа и смазки в машинах.

УДК 620.179.112(075,8)

ББК 34.41я73

ISBN 978-5-217-03437-6

© Издательство "Машиностроение", 2008

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

21 ММ 10/04

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Общие вопросы трибологии и триботехники	7
1.1. Трибология и ее развитие	7
1.2. Основные понятия и определения	9
1.3. Потери на трение в машинах и качественная картина износа деталей	10
1.4. Экономические аспекты проблемы трения и износа при эксплуатации техники	18
1.5. Роль смазки в трибосопряжениях	22
Глава 2. Конструкционная прочность и состояние поверх- ностного слоя трибосопряжения	24
2.1. Особенности строения твердых тел	24
2.2. Состояние материала деталей при циклических нагрузениях ..	29
2.3. Избыточная энергия поверхностного слоя	35
2.4. Структура и физико-механические свойства материала поверхностного слоя	38
2.5. Поверхностно-активные вещества. Эффект Ребиндера. Трещины Гриффитса	40
2.6. Особенности поведения жидкостей и газов на поверхно- сти трения	43
Глава 3. Топография поверхности и контакт твердых тел	45
3.1. Макрогеометрия поверхности деталей	45
3.2. Микрогеометрия поверхности деталей	46
3.3. Методы оценки микрогеометрии поверхности	47
3.4. Радиус кривизны микронеровностей и кривая опорной поверхности	49
3.5. Фрикционные связи при контакте неровностей	50
3.6. Площади контакта шероховатых поверхностей	53
Глава 4. Природа и виды внешнего трения	57
4.1. Основные закономерности трения скольжения при отсут- ствии смазочного материала (сухое трение)	58
4.2. Трение при граничной смазке	66
4.3. Жидкостное трение	73
4.4. Трение качения	82
4.5. Роль температуры при трении	86

Глава 5. Изнашивание материалов и деталей машин	90
5.1. Классификация видов изнашивания	92
5.2. Абразивное изнашивание	94
5.2.1. Изнашивание о закрепленный абразив	96
5.2.2. Изнашивание в абразивной прослойке	97
5.2.3. Изнашивание в абразивной массе	98
5.2.4. Изнашивание при ударе по абразиву	100
5.2.5. Газоабразивное изнашивание	101
5.2.6. Гидроабразивное изнашивание	103
5.3. Усталостное изнашивание	104
5.4. Кавитационное изнашивание	109
5.5. Адгезионное изнашивание	112
5.6. Эрозионное изнашивание	114
5.7. Окислительное изнашивание	115
5.8. Водородное изнашивание	116
5.9. Изнашивание при фреттинг-коррозии	117
5.10. Электроэрозионное изнашивание	119
Глава 6. Фрикционные, антифрикционные и смазочные материалы	120
6.1. Природа фрикционности и антифрикционности	120
6.2. Фрикционные материалы	121
6.3. Антифрикционные материалы	124
6.4. Смазочные материалы	129
6.5. Выбор смазочного материала для узла трения	137
Глава 7. Основные способы повышения износостойкости материалов и деталей машин	141
7.1. Конструкционные способы	141
7.2. Технологические способы	153
7.3. Эксплуатационные способы	158
7.4. Расчетные методы оценки износостойкости деталей и материалов деталей машин	160
Глава 8. Моделирование и лабораторные испытания на трение и изнашивание	178
8.1. Основы моделирования трибологических процессов	178
8.2. Испытание на трение и изнашивание	187
8.3. Общая методология испытаний на трение и изнашивание	196
Список литературы	205

ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности труда, экономии топливно-энергетических, материальных и трудовых ресурсов, обеспечение технического уровня и конкурентоспособности на мировом рынке продукции машиностроения зависят от эффективности, надежности, безопасности, экологичности машин и механизмов, приборов и другого оборудования.

Одной из главных задач, стоящих перед машиностроением, является повышение надежности и долговечности машин. Действительно, повышение долговечности отдельных машин на 30...40 % равноценно такому же увеличению производства, что приводит к высвобождению огромных финансовых, материальных и трудовых ресурсов. В тоже время, долговечность машин, под которой понимают способность сохранять работоспособность до предельного состояния, чаще всего определяется не поломками из-за низкой прочности отдельных деталей, а износом поверхностей трения, т.е. изменением их размеров вследствие изнашивания. В результате износа нарушается герметичность (например, в трибосопряжении цилиндр-поршень), теряется точность взаимного перемещения деталей (направляющие и суппорт станков) и т.п., и, как следствие этого, ухудшаются показатели работы машины.

Повышенный износ вызывают удары и вибрации, что может привести к авариям. Часто выход из строя многотонного агрегата обуславливается износом и потерей работоспособности небольшой детали, в то время как сам износ выражается долями миллиметра.

Таким образом, износ в большой мере определяет срок службы машин. Например, для закрытой зубчатой передачи это несколько тысяч часов, цепной – несколько сот часов. Лемех плуга изнашивается в течение несколько десятков часов. Изношенное оборудование подвергается ремонту, при этом его стоимость часто в 3 – 10 раз превышает стоимость нового изделия.

Другая сторона проблемы состоит в том, что при работе машин значительная часть энергии бесполезно расходуется на тре-

21/11/1984

ние. Но трение не всегда играет отрицательную роль. Например, в тормозных устройствах автомобилей, тракторов, железнодорожных поездов, самолетов требуется решать обратную задачу – повысить силу трения. С использованием силы трения работают резьбовые соединения, соединения с гарантированным натягом, фрикционные и ременные передачи и другие механизмы.

Можно с уверенностью отметить, что современный человек, опираясь на науку и опыт, одержал важные победы над трением на транспорте, в промышленности и в быту и в значительной мере подчинил его себе. Это достигнуто, в основном, благодаря освоению и массовому производству опор качения, созданию многочисленных типов минеральных и синтетических смазок, в том числе твердых и газообразных, способных работать в тяжелых и необычных условиях, включая и космическое производство. Однако такие технические возможности появились сравнительно недавно, в основном лишь во второй половине XX века. В то же время быстро развивающаяся техника в XXI веке не только не снимает с повестки дня проблемы трения, а наоборот, часто ставит их во все более острой форме. Проблемы, связанные с трением и изнашиванием, нередко встают на пути прогрессивных конструкторских идей, сдерживая их реализацию на десятки и сотни лет.

Данное пособие, как и изучаемая студентами машиностроительных и механических специальностей дисциплина «Трибология и триботехника» или «Трение и износ в машинах», позволит более целенаправленно применять основные трибологические закономерности для решения конкретных конструкторских, технологических и эксплуатационных задач, связанных с трением, износом и смазкой в машинах и механизмах.

Глава 1

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРИБОЛОГИИ И ТРИБОТЕХНИКИ

1.1. ТРИБОЛОГИЯ И ЕЕ РАЗВИТИЕ

Трибология – наука о явлениях, закономерностях и процессах трения изнашивания и смазки в машинах и механизмах.

Триботехника включает прикладную часть трибологии, методы и средства обеспечения работоспособности узлов трения.

Слово трибология произошло от греческого *tribos* – трение. Этот термин появился в 1966 году в Великобритании в результате работ над проблемами трения и изнашивания под руководством проф. П. Джоста. Сам Джост считает, что 9 марта 1966 года является днем рождения трибологии как новой научной дисциплины [12].

Вопросами трения занимались люди с древних времен. Первые зарегистрированные количественные исследования трения были проведены гениальным ученым, инженером, живописцем Леонардо да Винчи (1452 – 1519 гг.). Его экспериментальный подход по существу аналогичен современным методам, используемым в обычных лабораторных работах (изменение силы и момента трения). Леонардо да Винчи занимался научными исследованиями трения, разработкой материалов для подшипников. Им впервые введено понятие коэффициента трения как отношение силы трения к нормальной нагрузке. Его работы базировались на механической гипотезе, согласно которой предполагалось, что при трении происходит механическое зацепление неровностей поверхности. В дальнейшем установлением основных закономерностей трения и разработкой антифрикционных материалов занимались: Г. Галилей, И. Ньютон, М. В. Ломоносов, Ш. Кулон, Л. Эйлер.

Д.И. Менделеев отмечал, что «... предмет трения твердых тел труден. Необходимо иметь много опытных данных, чтобы узнать законы трения».

В России основы науки о трении и изнашивании были заложены М.В. Ломоносовым. Крупный вклад в науку о трении внесли Л. Эйлер, Н.П. Петров, Н.Е. Жуковский, С.П. Королев, В.Д. Кузнецов, А.Ю. Ишлинский, П.А. Ребиндер, В.В. Коршак, Н.С. Журков, Г.М. Бартеньев, А.К. Зайцев, А.С. Ахматов, В.А. Белый, Б.В. Дерягин, И.В. Крагельский, Б.И. Костецкий, Д.В. Коивисаров, В.Н. Кашеев, В.Ф. Лоренц, А.И. Петрусевич, М.М. Хрущев и др.

В наше время отечественная школа трибологов насчитывает десятки известных во всем мире имен и среди них: В.А. Балакин, Н.А. Буше, И.А. Буяновский, В.Н. Виноградов, Д.Н. Гаркунов, И.Г. Горячева, Н.Б. Демкин, Ю.Н. Дроздов, Ю.А. Евдокимов, С.П. Козырев, В.И. Колесников, А.С. Кужаров, Н.М. Михин, Р.М. Матвеевский, Н.К. Мышкин, В.Г. Павлов, А.С. Проников, С.Б. Ратнер, Э.В. Рыжов, А.А. Силин, Г.М. Сорокин, А.И. Свириденко, А.П. Семенов, М.Б. Ткачев, А.В. Чичинадзе, а также зарубежными учеными: К. Ахо, Р.Л. Байер, Ф. Боуден, К. Лудема, Д. Мур, Г. Польцер, О. Рейнольдс, Г. Соломон, Д. Тейбор, М. Хебда, Г. Фляйшер и другие.

Исследования в области трения, смазки и изнашивания машин получили особое развитие, начиная с 50-х годов XX столетия в связи с созданием мощных технических средств и повышением в них рабочих скоростей, нагрузок и температур. Однако опыт по разработке трибосопряжений, накопленный в машиностроении за весь период его развития, относится главным образом к земным условиям.

Совершенно иными являются, например, условия работы космических объектов, характеризующиеся высоким и сверхвысоким вакуумом, интенсивным воздействием различных излучений, необычайными тепловыми условиями и, наконец, невесомостью. Специфичны также условия, возникающие при работе технических устройств в атомной промышленности (интенсивное жесткое облучение и высокие температуры), энергомашиностроении (высокие температуры и химически активные среды), криогенной технике (сверхнизкие температуры), магнитных устройствах для хранения информации. Достаточно отметить, что крупнейшая компания IBM (США) по разработке и производству персональ-

ных компьютеров имеет солидные лаборатории по изучению износостойкости носителей информации. Руководит этими лабораториями известный в мире триболог Р. Л. Байер.

Необычные и напряженные условия все чаще заставляют создателей новой техники пересматривать традиционные, сложившиеся в течение многих лет принципы разработки узлов трения и основанные на них конструкторские решения. Триботехнические задачи решаются порой весьма успешно. Часть из них имеет прямое инженерное приложение при решении практических задач.

Термин «триботехника» определяет новый взгляд на давно изучаемый предмет, новый подход к его исследованию. Другими словами, триботехника призвана изучать процесс взаимодействия рабочих поверхностей деталей с целью разработки практических мероприятий по повышению надежности машин и является инженерным приложением науки о трении, смазке и износе при разработке, конструировании, испытании и эксплуатации элементов машин, т.е. является предметом, представляющим огромный практический интерес для техники.

1.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В последние годы в трибологии получили развитие новые разделы: трибохимия, трибофизика, трибомеханика и трибобиомеханика. Трибохимия изучает взаимодействие контактирующих поверхностей с химически активной средой. Трибофизика изучает физические аспекты взаимодействия поверхностей при взаимном их перемещении. Трибомеханика изучает механику взаимодействия контактирующих поверхностей при трении. Трибобиомеханика изучает механику биологических систем при контактном их взаимодействии при трении.

Более 98 терминов, относящихся к трению и износу, стандартизованы и рассматриваются в ГОСТ 27674-88. К числу этих терминов относятся:

внешнее трение – сопротивление относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии;

сила трения – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, направленной по касательной к общей границе между этими телами;

коэффициент трения – отношение силы трения между двумя телами к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу;

изнашивание – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющейся в постепенном изменении размеров и формы тела;

износ – результат процесса изнашивания, определяемый в установленных единицах (длины, объема, массы и т. д.);

износостойкость – свойство материала детали оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания;

интенсивность изнашивания – отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или объему выполненной работы;

смазочный материал – материал, вводимый на поверхности трения для уменьшения силы трения и (или) интенсивности изнашивания;

смазка – действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и (или) интенсивность изнашивания.

1.3. ПОТЕРИ НА ТРЕНИЕ В МАШИНАХ И КАЧЕСТВЕННАЯ КАРТИНА ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ

Автомобили, теплоходы, самолеты перемещаются в пространстве за счет сжигания колоссального количества топлива. Пуля или снаряд, выпущенные с огромной скоростью, полностью теряют ее всего через несколько секунд полета. Общей и хорошо известной причиной всех этих фактов служит трение, на преодоление которого всегда необходимо затрачивать определенную энергию.

Трение – удивительный феномен природы [38]. Оно подарило человечеству тепло и огонь, возможность в короткое время остановить скоростной поезд и автомобиль, ускорить химическую реакцию, записать человеческий голос на пластинку, услышать звуки скрипки и многое другое. Однако до настоящего времени трение во многом его аспектах остается загадкой. При трении одновременно происходят механические, электрические, тепловые, физические и химические процессы. Трение может упрочнить или разупрочнить металл, повысить или уменьшить в нем содержание углерода, насытить металл водородом или обезводородить его, превратить золото, платину в оксиды, отполировать детали и сварить их. Трением в широком смысле слова называют такое взаимодействие движущегося тела с другими телами или окружающей средой, которое сопровождается рассеянием энергии. Мерой трения служит количество энергии, рассеянной на единицу пути. Оно имеет размерность силы и численно равно силе трения, или силе сопротивления среды.

Легче всего судить о трении как о вредном явлении, на борьбу с которым, по некоторым оценкам, уходит от одной трети до половины энергетических ресурсов в мире [29]. Во многих случаях необходимо учитывать также то, что указанная энергия не просто теряется, а превращается в тепло, которое, скапливаясь в машине или приборе, нагревает их, создавая угрозу отказа.

Значительно менее заметна, хотя и чрезвычайно важна, полезная роль трения. Моделью такой ситуации является гололед. Небольшой морозец после оттепели или дождя приводит вдруг к ошеломляющим последствиям из-за того, что трение лишь частично исчезло. Число дорожных происшествий в период гололеда в тысячи раз превышает обычный уровень. Еще более неприятен и опасен для водителей отказ тормозов, в котором трение играет полезную роль.

С трением связана еще одна из самых острых проблем современности – износ машин и механизмов. Действуя постепенно и почти незаметно для глаза, изнашивание приводит машину или прибор к такому состоянию, что дальнейшее их использование становится нерациональным или даже опасным.

Выход из строя деталей и рабочих органов машин при нормальных условиях эксплуатации редко являются следствием их недостаточной прочности или чрезмерной ползучести материалов. Наиболее распространенной причиной выхода деталей и рабочих органов машин из строя является не поломка, а износ или повреждение рабочих поверхностей. Почему? Методами расчета деталей на прочность человечество занимается более 100 лет, и они достаточно хорошо сегодня отработаны. Кроме того, еще велики коэффициенты запаса прочности ($n = 1,5...3$). Методы расчетов на износостойкость пока еще несовершенны и порой для многих деталей отсутствуют. В то же время большинство машин (85...90 %) выходят из строя по причине износа деталей.

Особенно велик износ деталей и рабочих органов машин-орудий, которые эксплуатируются в абразивных и агрессивных средах. Для дробилок массой 6 т при дроблении высокоабразивных пород расходуется в год 17 т дробящих плит. Дизели, установленные на карьерных самосвалах, требуют капитального ремонта после 1500...2000 ч работы. Бортовые шестерни тракторов работают до замены не более 2000...2500 ч. За сезон работы тракторов на песчаных почвах приходится заменять 2...3 комплекта гусениц (это 50 % стоимости нового трактора), лемех тракторного плуга в среднем обрабатывает до полного износа 15...20 га почвы.

Затраты на ремонт и техническое обслуживание машин в несколько раз превышают их стоимость, например, автомобилей в 6 раз, самолетов до 5 раз, станков до 8 раз, горных машин в 15 раз.

Объем трудовых затрат за срок службы автомобиля распределяется так: 1,4 % – изготовление, 45,4 % – техобслуживание, 46 % – текущий ремонт, 7,2 % – капремонт. Более 50 % трудовых затрат уходит на ремонт.

Одной из главных причин износовых отказов является износ подвижных сопряжений машин – трибосопряжений. Хотя относительные величины износа, например отношение потери массы машины к ее первоначальной массе, иногда весьма малы, износ приводит к выходу из строя всего дорогостоящего изделия. Легковой автомобиль, например, имеет в среднем массу, равную 1000 кг. Если потеря его массы, вследствие износа трибосопряжений, со-

ставит 1 кг, то он уже не подлежит ремонту. Наибольший вред для автомобильного хозяйства оказывают коррозионно-механические виды изнашивания. Исследования и практика показывают, что проблема коррозионного разрушения кузова легковых автомобилей существует в двух аспектах: коррозия скрытых и труднодоступных поверхностей и коррозия низа кузова.

Способы предотвращения от коррозии деталей, входящих в различные группы, различны. Причина этому – разное воздействие среды. Если для внутренних поверхностей наиболее характерным признаком является постоянное присутствие влаги, то для низа кузова легкового автомобиля определяющим является изнашивание антикоррозионного защитного покрытия ударным воздействием потока пыли, песка, соли, щебня и других быстродвижущихся твердых частиц, отбрасываемых колесами автомобиля. Уже в первые месяцы эксплуатации автомобилей элементы кузова имеют очаги коррозии на участках с изношенным покрытием, т.е. под воздействием абразивных частиц разрушается сначала защитное покрытие (нарушается его сплошность), а затем происходит интенсивное коррозионное или совместное коррозионно-механическое изнашивание полостей низа кузова автомобиля.

Убытки, наносимые коррозией на автомобильном транспорте, соизмеримы с капиталовложениями в целые отрасли народного хозяйства. Это связано с тем, что, в первую очередь, коррозионному воздействию на автомобиле подвергается кузов, точнее узлы его нижнего пояса, а кузов является наиболее дорогостоящей частью автомобиля (до 72...78 % от полной стоимости легкового автомобиля).

На автомобильном транспорте Россия теряет ежегодно вследствие коррозии 27...30 тыс. тонн высококачественной стали. Ежегодные убытки от коррозии легкового автотранспорта в мире составляют: в США – 8,5...17 млрд долларов, в ФРГ – 1,5...2 млрд марок, в Англии – 0,25 млрд фунтов стерлингов, в Швеции – 0,5 млрд крон.

Абразивному изнашиванию подвержены детали и узлы трения большинства машин и оборудования. На рис. 1.1 показан газоабразивный износ лопатки дробебетного аппарата из легированного



Рис. 1.1. Газоабразивный износ лопатки дробебетного аппарата
(материал – чугун 110Г13Л)

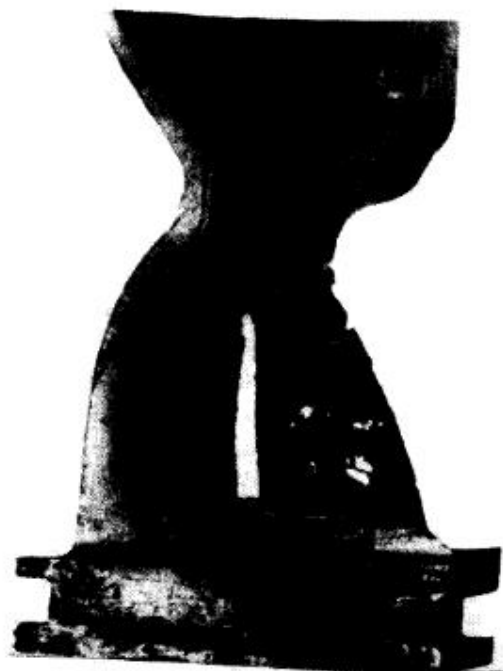


Рис. 1.2. Газоабразивный износ лопатки турбокомпрессора
(материал – сталь У10)

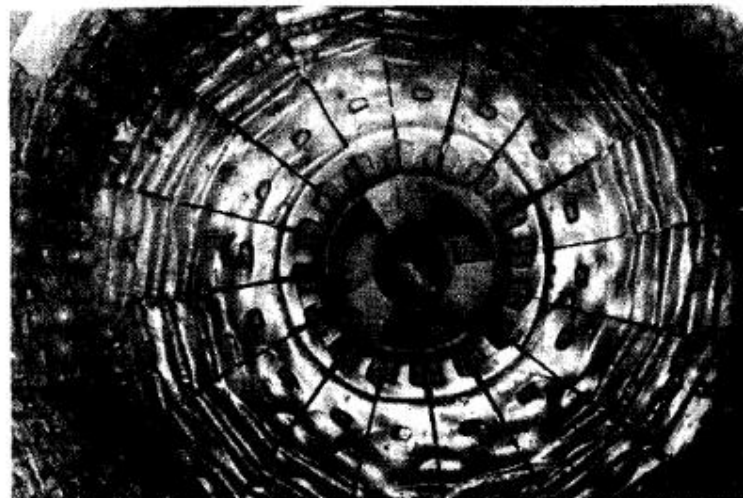


Рис. 1.3. Износ торцевой футеровки барабана шаровой мельницы
(материал – сплав 110Г13Л)

чугуна после 50 ч эксплуатации, а на рис. 1.2 износ лопатки турбокомпрессора во время пыльной бури в течение всего 5 суток.

Футеровка шаровых мельниц (рис. 1.3), применяемых на горнообогатительных предприятиях, имеет массу одного комплекта в зависимости от производительности мельниц в пределах 30...50 т и служит не более 6...8 месяцев [35].

На рис. 1.4 представлена спираль классификатора Урупского ГОКа диаметром 2000 мм и длиной 12,5 метров. Для защиты спирали от абразивного износа используются футеровочные сектора (рис. 1.5). Масса новой футеровки для одной спирали составляет 2,5...3 т, а срок ее службы – от 3 до 6 месяцев.

Весьма интенсивно изнашиваются рабочие колеса песковых насосов, изготавливаемые обычно из высоколегированного чугуна ИЧХ28Н2 (рис. 1.6, а, б).

Срок их службы не превышает 360...400 ч, износ за это время составляет 67 % от их первоначальной массы. Анализ состояния изношенных колес показывает, что за указанный срок лопасти, передний и задний диски колеса практически полностью изнашиваются (рис. 1.6, б). Изношенная поверхность колеса представляет



Рис. 1.4. Спираль классификатора

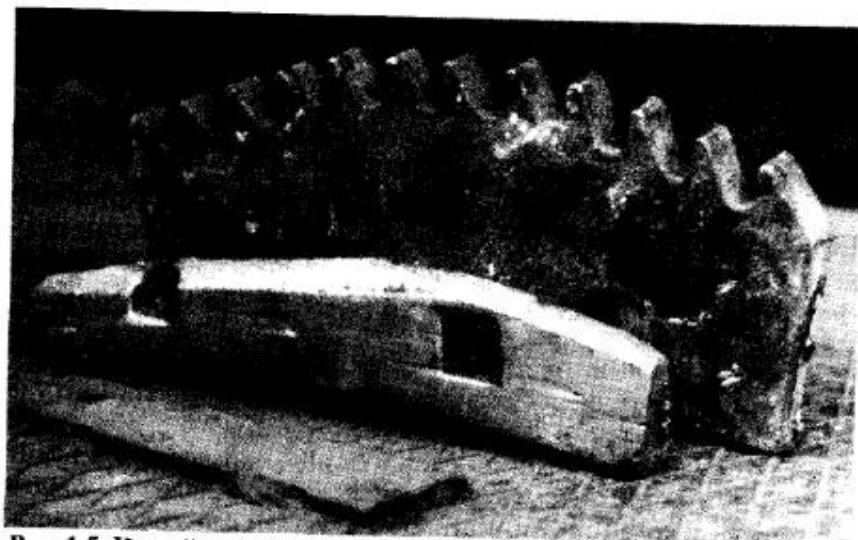


Рис. 1.5. Новый и изношенный за 4 месяца работы сектор футеровки (материал – чугун ИЧХ28Н2)



а)

б)

Рис. 1.6. Рабочее колесо пескового насоса:
а – новое; б – после 360 ч эксплуатации

собой волнообразный рельеф с местными углублениями и сквозными кавернами. Такую же изношенную волнистую поверхность имеют и рабочие колеса более мощных центробежных грунтовых насосов, гидротурбин, корабельных винтов, затворов и другого оборудования. Иногда гидроабразивному износу сопутствует кавитация. Интенсивность совместного кавитационно-гидроабразивного изнашивания еще выше.

1.4. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ

Обычно последствия износа машин и механизмов в результате изнашивания их рабочих деталей проявляются двояко. Первое – это снижение технико-экономических показателей машин по мере износа их деталей (мощности, производительности, КПД, расхода топлива, электроэнергии и т.п.). Второе – затраты на проведение ремонтных работ по устранению последствий износа рабочих де-

629984

БИБЛИОТЕКА
Брянского государственного
технического университета

талей (затраты труда, материалов, запчастей, энергии и т.д.). На практике чаще учитывают только второе. В то же время ухудшение технико-экономических показателей машин в эксплуатации вследствие износа их рабочих деталей обходится народному хозяйству гораздо дороже.

Влияние износа деталей на технико-экономические показатели машин и механизмов может быть показано на примере гидротурбины с сильно изношенным рабочим колесом до (кривая 1) и после (кривая 2) капитального ремонта.

Сопоставление рабочих характеристик показывает, что КПД изношенного колеса в рабочем диапазоне изменения мощности (5...6 тыс. кВт) в среднем на 13 % ниже, чем КПД после ремонта. В результате износа турбины теряется около 12...14 % выработки электроэнергии. Поддержание КПД гидротурбин на высоком уровне путем своевременной замены частично изношенных рабочих колес экономически оправдано уже при падении этого показателя на 0,2 %.

Еще одна проблема состоит в том, что при работе машин значительная часть подводимой энергии бесполезно расходуется на трение. Так, при работе металлообрабатывающего станка только 70 %

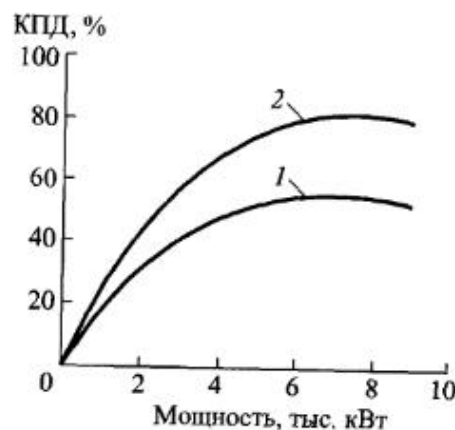


Рис. 1.7. Рабочая характеристика гидротурбины

энергии расходуется полезно, т.е. полезного — всего 20 %, а остальные 30 и 80 % теряются на трение и износ. В целом в промышленности расходуется на трение миллиарды киловатт-часов электроэнергии. Следовательно, снижение затрат на трение представляет собой важнейшую задачу.

Несмотря на крупные успехи в повышении экономичности теплосиловых установок, удельный расход топлива до сих пор остается одной из важнейших характеристик любого теплового двигателя и находится в центре внимания.

Основная энергия при транспортировке груза затрачивается на преодоление внешнего сопротивления в результате трения о твердое дорожное покрытие, воздух или воду. Энергетическую эффективность любого транспортного средства, равномерно движущегося в сопротивляющейся среде, можно оценить безразмерным коэффициентом (энергетическим критерием):

$$K = \frac{v^*}{K^*}, \quad (1.1)$$

где $v^* = v/v_0$ — скоростной коэффициент; $K^* = R(v)/G$ — коэффициент сопротивления; v — скорость перемещения груза транспортным средством; v_0 — скорость пешехода; $R(v)$ — сила сопротивления среды при скорости v ; G — масса груза.

Из выражения (1.1) следует, что эффективность перевозки тем выше, чем больше масса груза и скорость его перемещения и чем меньше преодолеваемое сопротивление при той же скорости перемещения.

В табл. 1.1 приведена оценка с помощью критерия (1.1) энергетической эффективности основных видов транспорта прошлого и настоящего [38].

Анализ данных табл. 1.1 показывает, что наиболее экономичным видом транспорта в энергетическом плане являются железнодорожный и водный, которые характеризуются более высокими значениями коэффициента K .

1.1. Энергетическая эффективность транспортных средств

Способ транспортировки груза	Скоростной коэффициент, v^*	Коэффициент сопротивления, K^*	Энергетический критерий, K
Волок	1,0	0,300	3,3
Повозка-лошадь	1,5	0,075	20,0
Гребное судно	3,0	0,006	500,0
Парусное судно	4,0	0,003	1333
Железная дорога	15,0	0,006	2500
Теплоход	10,0	0,004	2500
Автомобиль	30,0	0,200	150
Самолет	200	1,1	182

Рентабельность же современного транспорта (автомобильного и авиационного) обусловлена в первую очередь не расходом топлива, а экономией во времени, достигаемой при перевозке грузов и пассажиров. Если нет особых требований к скорости доставки груза, то автомобильный и авиационный транспорт будут нерентабельны. Однако скорость доставки чаще всего необходима для деловых людей и пассажиров. Кроме того, очень важными являются такие факторы, как доставка груза непосредственно потребителю на склад, магазин (автомобильный), на космические объекты, другие планеты (ракетный) и т.д.

При $v = 80$ км/ч на преодоление сопротивления воздуха затрачивается половина мощности современного автомобиля, а при $v = 130$ км/ч встречный воздушный поток съедает уже две трети мощности. В этой связи сила сопротивления внешней среды (или коэффициент внешнего трения) $R(v)$ для среднего легкового автомобиля составляет 0,16 при $v = 80$ км/ч и 0,33 при $v = 130$ км/ч. Приведенные значения во много раз превосходят коэффициент трения колеса по хорошему шоссе, не говоря уже о рельсах железной дороги. Другими словами, на борьбу с сопротивлением воздуха ежегодно затрачивается десятки миллионов тонн бензина, керосина, масел.

Одной из важнейших причин рассеяния энергии при взаимодействии быстро движущегося тела с окружающей средой являются образование и срыв вихрей, обладающих значительной кинетической энергией. Вихрей обычно тем меньше, чем удачнее выбрана форма транспортного средства. Однако условия движения обычно непрерывно меняются (скорость, подъемы, спуски, повороты, виражи и т.д.). Теория показывает, что с учетом этих изменений необходимо было бы изменять форму транспортного средства. Это делает дельфин в воде, благодаря сильно разветвленной системе кровеносных сосудов и нервных волокон, находящихся на эластичном покрове. Поэтому дельфин развивает большую скорость (до 100 км/ч), т.к. его тело обладает аномально низким сопротивлением и выделяет соответствующую жировую прослойку, которая тоже снижает сопротивление среды. Пока ни один надводный и подводный корабль не имеет такой скорости.

Пути увеличения энергетического критерия K . В первую очередь необходимо научиться снижать сопротивление среды $R(v)$. В этой связи рассматриваются некоторые пути, хотя порой они кажутся фантастическими:

- способность автоматически изменять форму транспортного средства в соответствии с конкретными условиями так, чтобы обтекание во всех случаях оказалось оптимальным;

- создание вакуумированных транспортных туннелей, которые позволили бы исключить или резко уменьшить сопротивление воздушной среды (тяга, например, электромагнитная, гравитационная и т.д.). Транспортные кабины в этом случае могли бы иметь скорость $v = 400 \dots 600$ км/ч и $K = 104$ без систем вакуумирования.

Наиболее эффективным является создание для транспортных средств соответствующих обтекаемых форм. Теоретически наиболее выгодной является каплеобразная форма экипажа. Поэтому необходимо убрать все выступающие части (раскрытая антенна на автомобиле дает 200 г на 100 км расхода топлива, а багажник на крыше без груза – около 600 г на 100 км). Эти факторы необходимо учитывать при конструировании и эксплуатации транспортных средств.

1.5. РОЛЬ СМАЗКИ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ

Для снижения трения и изнашивания деталей машин в технике широко используются смазочные материалы, которые, в совокупности с деталями трибосопряжения, формируют трибосистему, состоящую из двух деталей и «третьего тела» – смазочного материала. Оптимально подобранные смазочные материалы позволяют в десятки и сотни раз снизить интенсивность трибологических процессов в узлах трения машин в сравнении с интенсивностью тех же процессов при отсутствии указанного материала.

В зависимости от вида сопрягаемых деталей и смазочного материала на границе их раздела могут происходить различного уровня физико-химические процессы, сопровождающиеся модификацией поверхностей сопрягаемых деталей с образованием вторичных структур. При оптимальном соотношении свойств этих структур образуются износостойкие вторичные структуры, которые способствуют снижению коэффициента трения и, соответственно, изнашивания.

В зависимости от количества смазочного материала, поступающего в зону контакта твердых тел, возможно возникновение различных видов смазки. Это можно проиллюстрировать с помощью диаграммы Герси–Штрибека (рис. 1.8), устанавливающей зависимость между коэффициентом трения f в подшипнике и числом Зоммерфельда.

Число Зоммерфельда может быть найдено по формуле

$$S_0 = \frac{p\psi^2}{\eta\omega}, \quad (1.2)$$

где p – среднее давление в подшипнике; $\psi = (d_{\text{вт}} - d_{\text{н}})/d_{\text{н}}$ – относительный зазор в подшипнике; $d_{\text{вт}}$ и $d_{\text{н}}$ – диаметр отверстия во втулке и вала под подшипником; η – коэффициент динамической вязкости масла; ω – угловая скорость вращения вала.

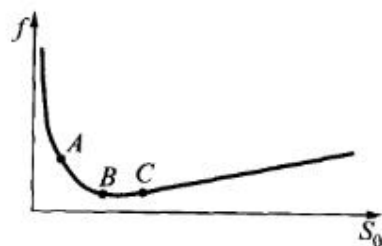


Рис. 1.8. Диаграмма Герси–Штрибека

В зоне смазки $A-B$ имеет место граничное трение, в зоне $B-C$ – жидкостное трение. Жидкостная смазка обеспечивает устойчивый режим работы сопряжения. Некоторое повышение коэффициента трения f в зоне правее точки B связано с повышением толщины слоя смазки. Граничная смазка является неустойчивой фазой. Увеличение коэффициента трения на участке $B-A$ связано со снижением частоты вращения вала. Это приводит к уменьшению толщины масляной пленки и, соответственно, повышению среднего давления p , в результате чего ухудшаются условия работы сопряжения (прежде всего из-за схватывания поверхностей на микровыступах).

Наиболее благоприятные условия работы сопряжения обеспечивает жидкостное трение. При его реализации обеспечиваются минимальные значения коэффициента трения и снижение интенсивности изнашивания материалов.

Второе положительное качество смазки заключается в отводе тепла из зоны трения. С ростом температуры масло теряет свои эксплуатационные свойства – снижается коэффициент динамической вязкости η , а значит, и толщина гидродинамической пленки, разделяющей сопряженные поверхности.

Принудительное прокачивание масла через узел трения с последующей его очисткой в фильтрующих элементах кроме отвода тепла решает важную техническую задачу – удаление из зоны контакта трибосопряжений продуктов износа.

Третье положительное свойство смазки заключается в защите сопряженных деталей от коррозии. Защитные свойства масел обусловлены двумя основными факторами: механической изоляцией поверхности металлов от атмосферного воздействия и торможением электрохимических процессов коррозии на поверхности металлов.

И, наконец, смазка улучшает динамические и акустические характеристики трибосопряжения, так как обладая одновременно упругими и вязкими свойствами, помогает сглаживать динамические нагрузки и снижать шум в процессе эксплуатации механизма.

По агрегатному состоянию смазочные материалы разделяются на газообразные, жидкие, пластичные и твердые. В последние годы созданы и находят применение магнитные жидкие и порошковые смазочные материалы [31].

Глава 2

КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ И СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ

Потенциальные возможности конструкционных материалов используются полностью в тех случаях, когда качество поверхности детали удовлетворяет соответствующим требованиям. Качество поверхности влияет на износостойкость подвижных сопряжений, коррозионную стойкость, теплопередачу и усталостную прочность деталей при работе их в условиях переменных нагрузок.

Глубокие слои металла «устают» в меньшей степени, чем поверхностные. Под физической поверхностью обычно понимают границу раздела двух фаз, например, твердой и жидкой, твердой и газообразной. Однако правильнее говорить о пограничном поверхностном слое, который, в отличие от математической поверхности, имеет конечную толщину, сравнимую, по крайней мере, с размерами молекул.

Свойства поверхностного слоя отличаются от свойств материала в объеме, что обуславливает природу целого ряда явлений, объединяемых термином «поверхностные». К числу последних относится и внешнее трение. Для понимания природы внешнего трения необходимо познакомиться со свойствами поверхностных слоев машиностроительных материалов.

2.1. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

С физической точки зрения к твердым телам относятся только кристаллические тела. Для них характерно правильное расположение атомов – так называемая кристаллическая решетка.

Несмотря на многообразие кристаллических решеток, большинство твердых тел имеет решетку трех типов: объемно-центрированную кубическую (ОЦК), гранецентрированную кубическую (ГЦК), гексагональную плотноупакованную (ГПУ).

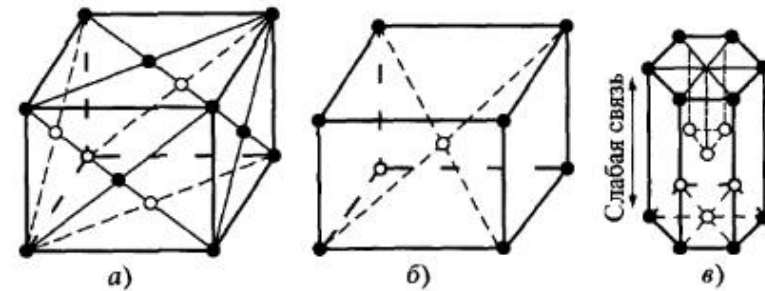


Рис. 2.1. Типы элементарных кристаллических ячеек:
а – ГЦК (Cu, Al, γ -Fe); б – ОЦК (Na, W, α -Fe); в – ГПУ (Mg, Zn, Ti, графит)

На рис. 2.1 показаны элементарные ячейки, многократным повторением которых можно получить твердое тело, являющееся в данном случае монокристаллом.

Для монокристаллов характерны правильная геометрия и анизотропия свойств (т.е. зависимость свойств от направления). В монокристаллах имеются так называемые плоскости легкого скольжения, вдоль которых происходит соскальзывание одной части кристалла относительно другой под действием механических напряжений.

Применяемые в технике металлы и их сплавы являются в основном поликристаллами, состоящими из множества зерен; в пределах одного зерна сохраняется правильная кристаллическая решетка. Для металлов размеры зерен составляют 1...10 000 мкм, толщина границ между зернами около 0,5 нм. Из-за хаотического расположения зерен поликристаллы изотропны, а свойства любой поверхности поликристалла в среднем одинаковы.

В объеме металлов имеется большое количество различных дефектов (вакансий, внедренных инородных атомов, дислокаций). Присутствует углерод в свободном или связанном состоянии, постоянные примеси (S, Mn, P, S, O, H и др.), легирующие элементы (Cr, Ni, W, V и др.), а также имеются разрывы сплошности материала в виде округлых пор и субмикротрещин.

Особое место в строении металлов занимают границы зерен. Материал на этих участках находится в ослабленном состоянии вследствие повышенной концентрации отмеченных выше дефектов. Об уровне возможной концентрации дефектов в металлах можно судить по расчетно-экспериментальным оценкам критической плотности дислокаций, при достижении которой в локальном объеме возникают трещины. Для металлов Fe, Ni, Cu, Al, Mg и др. эта величина находится в пределах $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [5].

Поры и трещины формируют в металлах развитую микрокапиллярную сеть, которая начинается на поверхности в виде системы микрокапиллярных и субмикрокапиллярных трещин и полостей, а далее переходит в фазовые поверхности раздела элементов, структурные и внутренние трещины. Благодаря такому строению металлов внешняя среда за счет адсорбционных и диффузионных процессов проникает внутрь их и оказывает физико-химическое воздействие на механические свойства приповерхностных слоев твердых тел.

При контактном взаимодействии твердых тел необходимо учитывать как объемные, так и поверхностные механические свойства металлов. Объемные свойства характеризуются известными из механики деформирования твердых тел величинами – модулем упругости E , пределом текучести σ_T , коэффициентом Пуассона μ и т. д. Поверхностные свойства принципиально должны характеризоваться теми же по физическому смыслу величинами. Однако вследствие сложности их определения используются интегральные величины – твердость и микротвердость. *Твердость* – это свойство материалов оказывать сопротивление проникновению в него более прочного эталонного материала.

Так, твердость по Бринелю НВ равна отношению вдавливающей силы F_n к площади поверхности лунки S , образовавшейся в материале после вдавливания в него шарика диаметром D из закаленной стали:

$$B = \frac{F_n}{S} = \frac{2F_n}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где d – диаметр отпечатка.

Микротвердость H_0 определяется при вдавливании в материал алмазной пирамиды:

$$H_0 = \frac{1,85F_n}{\alpha_1^2},$$

где α_1 – диагональ отпечатка, измеряемая под микроскопом, мм.

В силу конструктивных особенностей, заложенных в этот метод, он позволяет определять механические свойства в тонких поверхностных слоях (10...50 мкм), соизмеримых с глубиной деформаций материалов при трении. Между числом твердости по Бринеллю НВ и величиной предела прочности сталей при разрыве σ_n существует приближенная эмпирическая зависимость:

$$\sigma_n \approx 0,36\text{НВ}.$$

Полимеры как конструкционные материалы в современной технике занимают важное место наряду с металлами. Область их применения непрерывно расширяется. Физико-механические свойства полимеров отличаются от свойств металлов и сплавов. Полимеры состоят из огромных молекул, образующихся в результате соединения небольших групп атомов, чаще всего атомов углерода и водорода. В зависимости от формы и размеров молекул полимера свойства его могут меняться в самых широких пределах.

Линейные полимеры имеют линейные молекулы, связанные между собой силами Ван-дер-Ваальса. При повышении температуры такие полимеры легко размягчаются и переходят в жидкое состояние, причем изменение их свойств происходит постепенно (отсутствует фазовый переход первого рода – плавление). При комнатной температуре структура линейных полимеров полностью аморфная, или частично кристаллическая. Линейные полимеры являются основой термопластов, которые легко обрабатываются давлением при температурах до 200...300 °С. К термопластам относятся фторопласты, поливинилхлорид, капрон, полиэтилен, полистирол и др.

Полимеры с замкнутой пространственной сетчатой структурой составляют основу терморезистивных полимеров (фенолформальдегидные смолы, карболит, этрол и другие сильнонаполненные полимеры).

Особым классом термопластических полимеров являются каучуки. Вулканизированные серой каучуки – резины – являются термореактивными эластомерами.

Преимущества полимерных материалов: сравнительно низкая удельная стоимость; технологичность при изготовлении деталей; малая плотность и, соответственно, более высокая удельная прочность отдельных из них (стеклопластики и др.); хорошие изоляционные свойства; коррозионная стойкость. Недостатки: снижение физико-механических свойств со временем, под действием температуры, ультрафиолетового и ионизирующего излучения, влияния окружающей среды (кислорода, азота, воды и др.); не подчиняются закону Гука.

Модуль упругости этих материалов зависит от температуры и скорости деформации. Они обнаруживают заметную ползучесть при комнатной температуре, а при упругой деформации в полимерах наблюдается гистерезис, обусловленный значительным внутренним трением. Полимеры также обладают низкой теплопроводностью, что отрицательно влияет на их фрикционные характеристики.

В последние годы очень широко используются в машиностроении гуммированные детали благодаря их высокой износостойкости в абразивных средах, меньшей массе и хорошей ударно-и вибростойкости.

В отличие от металлов резины имеют S-образную форму кривой напряжения деформации при растяжении, высокую ползучесть и остаточную деформацию при комнатной температуре, значительный гистерезис, сильную зависимость механических свойств от температуры и режимов нагружения, постоянный объем при деформации. Кроме того, резины характеризуются высокой химической стойкостью. Также эластомеры обладают уникальными свойствами: эластичностью, высоким относительным удлинением (до 1000 %). Благодаря этим свойствам они широко используются в шинах, уплотнениях, манжетах и многих других ответственных деталях машин.

2.2. СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Переменным (циклическим) называется нагружение, при котором напряжения изменяются во времени по величине и по знаку или только по величине.

Способность материала сопротивляться разрушению под действием переменных напряжений называется выносливостью. Усталость же – это явление разрушения материалов в результате накопления повреждений, приводящих к возникновению трещин усталости при действии переменных напряжений.

Основными характеристиками переменных напряжений являются:

- максимальное и минимальное напряжения цикла – σ_{\max} , σ_{\min} ;
- среднее напряжение цикла

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2};$$

- амплитудное напряжение цикла

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2};$$

- коэффициент асимметрии цикла

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}.$$

На рис. 2.2 показаны различные циклы приложения переменных напряжений.

Различают два вида циклических нагружений – малоцикловое и многоцикловое.

Малоцикловое усталостное нагружение – это такой случай циклического нагружения, при котором разрушение происходит при повторном упругопластическом деформировании с числом циклов до 10^5 . Однако данная граница является условной и определяется переходом от упругопластического к упругому деформированию.

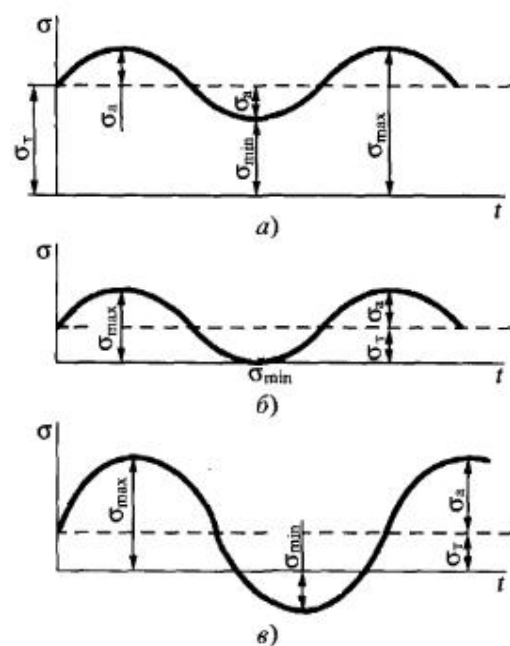


Рис. 2.2. Циклы переменных напряжений:
а – симметричный; б – отнулевой; в – асимметричный

Характерной особенностью малоциклового усталости является то, что в процессе знакопеременного деформирования образуется петля пластического гистерезиса (рис. 2.3).

Площадь петли пластического гистерезиса численно равна необратимой работе деформирования в каждом цикле нагружения. Основная часть этой работы переходит в тепло и рассеивается путем теплообмена, а некоторая относительно небольшая часть расходуется на развитие повреждений малоциклового усталости. О сопротивлении материала малоциклового разрушению судят по кривым усталости. На рис. 2.4 схематично показана кривая усталости стали 45 при симметричном цикле изменения нагрузки.

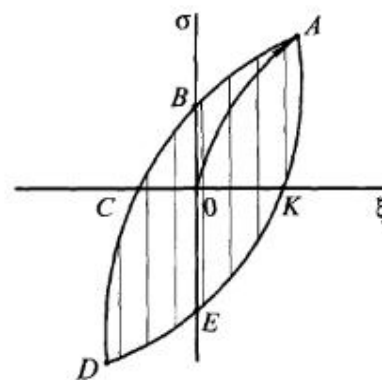


Рис. 2.3. Петля пластического гистерезиса

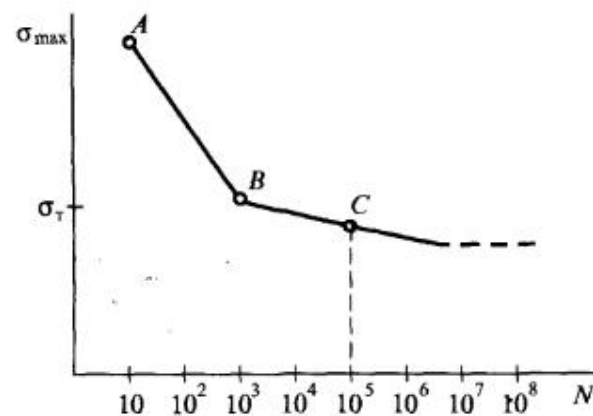


Рис. 2.4. Кривая усталости:
 N – число циклов нагружения; σ_{\max} – напряжение

На участке AB при высоких условных напряжениях σ_{\max} , близких к пределу прочности, разрушение носит квазистатический характер и происходит в тот момент, когда истинное напряжение постепенно возрастает, с образованием шейки и уменьшением площади поперечного сечения, и достигает величины истинного предела прочности. На участке BC происходит усталостное разру-

шение от трещины без локализации деформации. При продолжении участка *BC* далее он переходит в кривую многоциклового усталости.

Многоцикловое усталостное нагружение – это случай циклического нагружения, при котором разрушение происходит при повторном упругом деформировании с числом циклов от 10^5 до 10^7 и более. При многоциклового усталости в кристаллических материалах все же появляются весьма малые по площади петли гистерезиса, связанные с наличием в каждом цикле микропластических деформаций, развивающихся в отдельных, наиболее напряженных кристаллических зернах. Как и в случае с малоциклового усталостью, значительная часть необратимой работы деформирования рассеивается теперь на протяжении весьма большого числа циклов в виде тепла, но некоторая доля этой работы приводит к развитию усталостных повреждений. Процесс накопления повреждений можно условно разделить на две стадии: стадия рассеянных повреждений (микротрещины, вакансии и т. п.) и стадия развития магистральной (макроскопической) трещины, хотя фактическая граница между этими стадиями размыта и ее приходится фиксировать в определенной мере искусственно. Остановимся на первой стадии, т. е. на механизме возникновения микротрещин.

Пластическая деформация в микроскопических объемах связана с перемещением дислокаций – некоторых локальных нарушений закономерного расположения атомов в узлах кристаллической решетки отдельных зерен (рис. 2.5).

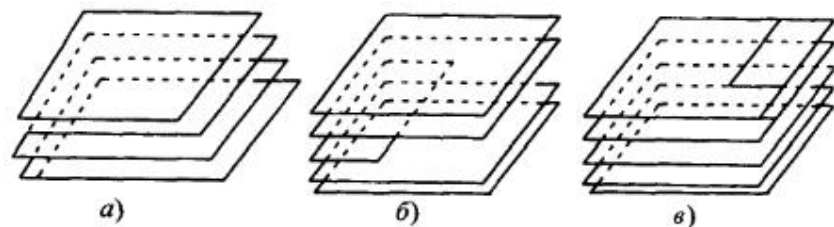


Рис. 2.5. Конфигурация сеточных плоскостей:

a – идеальный кристалл; *b* – краевая дислокация; *в* – винтовая дислокация

Для поступательного перемещения (скольжения) некоторой дислокации как единого геометрического целого внутри кристаллической решетки требуются определенные усилия сдвига, которые отвечают реальным касательным напряжениям. Начальные дислокации появляются еще в процессе кристаллизации соответствующего расплава, а при определенной величине касательного напряжения их движение (скольжение) порождает новые дислокации. В реальных кристаллах плоскости скольжения множества дислокаций распределяются неравномерно, группируясь в пачки, которые образуют так называемые «полосы скольжения», являющиеся зонами интенсивных макроскопических деформаций сдвига.

Помимо дислокаций существуют точечные дефекты в виде вакансий (пустот) и внедренных атомов. Образование вакансий связано с постоянными колебательными движениями атомов около их положения равновесия в узлах кристаллической решетки. Смещение от положения равновесия отдельного атома может быть настолько значительным, что атом преодолевает существующий потенциальный барьер и покидает свой узел решетки, оставляя в нем вакансию.

Перемещающиеся дислокации в процессе циклического нагружения могут взаимодействовать как друг с другом, так и с вакансиями, которые играют роль препятствий. В зонах образования узлов дислокаций и их скоплений перед вакансиями местные искажения кристаллической решетки могут достигать такой степени, что происходят разрывы физических связей с образованием микроскопических трещин. В условиях продолжающегося циклического нагружения микротрещина играет роль препятствия скольжению дислокаций и у ее кончиков возникают такие искажения кристаллической решетки, которые приводят к дальнейшим разрывам связей. Места концентрации микротрещин образуют «полосы скольжения», проходящие через множество зерен и приблизительно совпадающие по направлению с плоскостями действия наибольших касательных напряжений.

Под действием циклического нагружения микротрещины объединяются, образуя в итоге магистральную трещину, которая, развиваясь, приводит к разрушению детали.

Наибольшее количество дефектов, а значит и микротрещин, располагается на поверхности детали, то есть в процессе малоциклового и многоциклового нагружения поверхностный слой в первую очередь теряет поверхностную прочность, твердость и, соответственно, более интенсивно изнашивается.

Из всего многообразия особенностей действия переменных напряжений на детали машин можно выделить следующие:

– под действием переменных напряжений элементы конструкций и их поверхности при контактных взаимодействиях разрушаются при значительно меньших напряжениях, чем при статических нагрузках;

– при действии переменных напряжений возникает большое количество микротрещин, особенно на поверхности деталей, что приводит к ослаблению их поверхностного слоя.

На рис. 2.6 показан лабораторный образец, предназначенный для исследования возникновения трещин при малоциклового усталости до и после 100 циклов воздействий переменных напряжений.

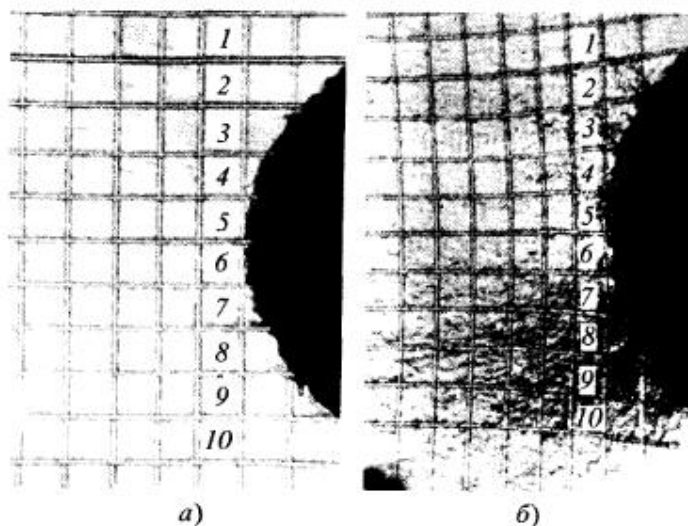


Рис. 2.6. Состояние лабораторного образца до разрушения (а) и после 100 циклов воздействия напряжений (б)

Размер ячейки показанной сетки равен 20 мкм. На микрофотографии поверхности образца (рис. 2.6, б) хорошо видны повреждения элементов структуры металла под действием таких напряжений (особенно в ячейках 7–10), которые впоследствии привели к образованию усталостных трещин.

Процесс возникновения и развития циклических повреждений, развивающихся в поверхностных слоях деталей, претерпевает качественные изменения и ускоряется под влиянием агрессивных жидких и газообразных сред. К подобным условиям длительного разрушения применяют термин «коррозионная усталость» и на начальных стадиях изучают с позиций физической химии, но по мере развития поверхностных раковин и трещин, проявляющих себя как концентраторы напряжений, вступают в силу закономерности механики разрушений.

Детали, работающие в условиях циклического нагружения, накапливают повреждения усталости в основном в поверхностном слое в виде микротрещин, что приводит при контактном взаимодействии с другими деталями к повышенному износу и преждевременному выходу этих деталей из строя.

2.3. ИЗБЫТОЧНАЯ ЭНЕРГИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Поверхность твердого тела, так же, как и поверхность жидкости, обладает избыточной энергией, которую называют поверхностной. В случае жидкости поверхностная энергия легко определяется через поверхностное натяжение. Для твердого тела это связано с определенными трудностями. Для процессов же трения и изнашивания поверхностная энергия имеет важное значение, т.к. она характеризует активность атомов поверхностного слоя.

Известно, что у большинства металлов каждый атом в объеме окружен двенадцатью соседями, а на поверхности – шестью. Поэтому поверхностная энергия должна быть примерно 1/6 энергии сублимации, т.е. энергии, необходимой для разделения твердого тела на независимые атомы.

Величина поверхностной энергии влияет на способность к образованию адгезионных связей. Под *адгезией* понимают притяже-

ние между разнородными телами, приведенными между собой в контакт. Это притяжение обуславливается силами молекулярного взаимодействия. В отличие от адгезии притяжение между атомами или молекулами внутри одного тела называют *когезией*. Чем больше поверхностная энергия, тем прочнее адгезионные связи и тем больше сопротивление относительно перемещению контактирующих тел.

Избыточная поверхностная энергия предопределяет также химическую активность поверхности твердого тела. Поэтому при нормальных условиях поверхность твердого тела никогда не бывает чистой. Она всегда покрыта различными поверхностными пленками: продуктами коррозии, адсорбированными газовыми и водяными пленками, адсорбированными углеродами.

Получить чистую поверхность твердого тела чрезвычайно трудно. Большинство металлов активно вступают в реакцию с окислителями, в первую очередь с кислородом и серой. Так, например, даже в вакууме при давлении 10^{-6} мм рт. ст. поверхность твердого тела покрывается монослоем адсорбированного газа примерно за 1 сек. При давлении 10^{-10} мм рт. ст. это время составляет несколько часов. При атмосферном давлении – сотые доли секунды. Образующиеся оксидные пленки на поверхности металла могут обладать защитным действием, и после того как на металлах образуется пленка некоторой толщины, дальнейший рост ее прекращается.

Кроме пленок оксидов на поверхности твердых тел могут образовываться сульфидные, водяные (до 100 нм), полимерные пленки. Металл часто играет роль катализатора в реакции полимеризации. Эти пленки обладают высокой прочностью и играют большую роль при трении. Основное влияние их на процессы трения заключается в том, что они препятствуют образованию прочных металлических связей, заменяя их гораздо более слабыми Ван-дер-Ваальсовыми. Если скорость окисления металла меньше скорости истирания пленки, то при трении пленка не успевает нарастать и не изолирует трущиеся поверхности. Твердость пленки оксидов обычно выше твердости металлов.

Если поверхности двух твердых тел сблизить до расстояния порядка межатомного, между атомами возникают силы взаимодействия, такие же, как между атомами в пределах одного тела. Эти силы являются одной из причин сопротивления относительному перемещению трущихся тел и обуславливают молекулярную (адгезионную) составляющую силы трения. Различают четыре основных вида сил межатомного взаимодействия: ионные, ковалентные, Ван-дер-Ваальсовы, металлические. Эти силы могут иметь физическую или химическую природу; их различие заключается, прежде всего, в энергии взаимодействия. Наиболее универсальна Ван-дер-Ваальсова связь, которая проявляется даже при взаимодействии совершенно инертных веществ. Эта связь наиболее слабая. Наиболее прочная из связей – ионная химическая (табл. 2.1).

2.1. Вид, энергия разрыва и природа образования связей

Вид связи	Энергия разрыва связи, эВ	Природа образования связи
Ионная	8,5	Образуется только между разнородными атомами, при этом один атом отдает часть электронов, а другой – приобретает. Ионные кристаллы имеют большое тепло- и электросопротивление и малую пластичность
Ковалентная (гомеополлярная)	6,0	Устанавливается за счет образования устойчивых электронных конфигураций путем обобществления электронов отдельными атомами. Природа этой связи ковалентно-механическая (например, алмаз). Имеет малую пластичность и тепло- и электропроводность

Продолжение табл. 2.1

Вид связи	Энергия разрыва связи, эВ	Природа образования связи
Металлическая	2,5	Обусловлена свободными электронами («электронный газ»). Этот «газ» как бы «скрепляет» ионы, находящиеся в кристаллической решетке. Металлическая связь между трущимися металлами возможна лишь при отсутствии окислительных пленок или если скорость истирания выше скорости образования этих пленок
Ван-дер-Ваальсова	0,1	Существует между любыми молекулами и атомами. Природа – электростатическая. Самая слабая, но и самая универсальная и распространенная при фрикционном взаимодействии

2.4. СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Упругие свойства материала в поверхностных слоях значительно отличаются от объемных свойств (E и G). Пластические свойства, в том числе и микротвердость, естественно изменяются по глубине.

Механическая обработка деталей сопровождается деформацией слоев и упрочнением (наклепом). В результате наклепа образуется сильно деформированная кристаллическая решетка металла, что приводит к повышению пределов прочности, текучести и микротвердости. Следующий ниже лежащий слой имеет искаженную кристаллическую решетку, неоднородно-распределенные внутренние напряжения между отдельными зернами, неустойчивые,

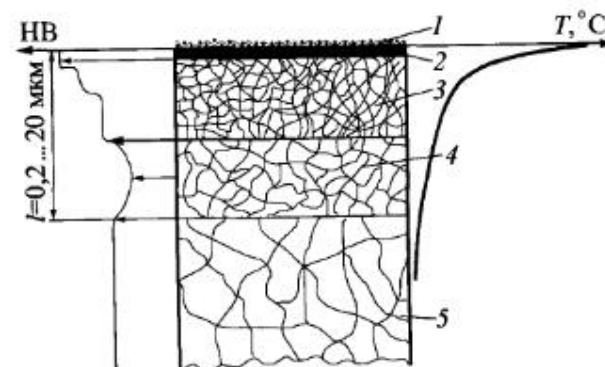


Рис. 2.7. Структура поверхностного слоя металла детали:

1 – адсорбированный слой, состоящий из пленок влаги, газов и загрязнений (0,01...0,1 мкм); 2 – слой оксида, имеющий повышенную твердость; 3 – слой с сильно деформированной кристаллической решеткой в результате наклепа; 4 – более глубокий слой с искаженной кристаллической решеткой и большим числом вакансий и дислокаций; 5 – металл с исходной структурой

неуравновешенные положения атомов, упругие искажения плоскостей скольжения кристаллов. Все это на определенной глубине придает металлу структурно-неустойчивое состояние.

Структура поверхностного слоя материала детали после механической обработки или внешнего трения одной детали относительно второй может быть представлена в виде пяти слоев (рис. 2.7).

При исследовании процессов трения и изнашивания особое значение имеет усталостная прочность материалов и деталей. Усталость – это, как отмечалось ранее, изменение состояния металла детали в результате многократного (циклического) деформирования, приводящее к его прогрессирующему трещинообразованию, а затем разрушению.

Усталостная прочность позволяет определять при циклическом нагружении материала число циклов до разрушения материала (см. рис. 2.4).

При трении наблюдается следующая последовательность процесса усталостного поверхностного разрушения: возникновение

дефектов в структуре решетки; появление в материале микротрещин; разрушение поверхности при выходе микротрещин наружу. Все изменения свойств в кристаллических материалах, которые обычно происходят при пластической деформации, могут быть устранены только в процессе рекристаллизации при соответствующей термообработке.

Рекристаллизация металлов – образование и рост одних кристаллических зерен за счет соседних зерен той же фазы. Протекает рекристаллизация при нагреве (отжиге) после холодной деформации. В результате снижается прочность, твердость металла и увеличивается его пластичность. Обычно для сталей температура рекристаллизации 300...400 °С.

Адсорбция – поглощение (концентрирование) веществ из растворов или газов на поверхности твердого тела. Тело, на котором происходит адсорбция, называют адсорбентом.

Диффузия – распространение вещества в какой-либо среде в направлении убывания его концентрации, обусловленное тепловым движением ионов, атомов, молекул, а также более крупных частиц.

Адсорбция и диффузия играют существенную роль в повышении или снижении износа в сопряжениях деталей.

2.5. ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА.

ЭФФЕКТ РЕБИНДЕРА. ТРЕЩИНЫ ГРИФФИТСА

Растворение жидкостей или кристаллических твердых тел в других жидкостях обычно сопровождается изменением поверхностного натяжения растворов. При этом концентрация растворимого вещества в поверхностном слое отличается от средних значений ее по объему растворителя. Этот процесс описывается уравнением Гиббса:

$$\Gamma = \frac{C}{R\theta} \frac{d\sigma}{dC},$$

где Γ – избыточная концентрация адсорбированного вещества на 1 см² поверхности раствора; C – объемная концентрация раство-

ряемого вещества в растворе; R – универсальная газовая постоянная; θ – абсолютная температура.

Вещества, которые снижают энергию поверхностного слоя ($d\sigma/dC < 0$), адсорбируются в избыточном количестве в этом слое, увеличивая концентрацию. Их называют *поверхностно-активными веществами* (ПАВ).

В трибологии роль ПАВ исключительно велика [11]. Они присутствуют практически в каждом смазочном материале (жирные кислоты, спирты, мыла и др.) и оказывают влияние на механические свойства твердых тел.

В 1928 г. П.А. Ребиндером был открыт эффект адсорбированного снижения прочности поверхностного слоя твердых тел под воздействием поверхностно-активных веществ жидкой среды.

Различают внешний и внутренний адсорбционные эффекты (рис. 2.8).

Внешний эффект происходит в результате адсорбции ПАВ на внешней поверхности деформируемого твердого тела (рис. 2.8, а). Для его осуществления необходимо предварительное нагружение материала и подбор соответствующего ПАВ.

Внутренний адсорбционный эффект вызывается адсорбцией ПАВ на внутренних поверхностях раздела – зародышевых микротрещинах разрушения, возникающих в процессе деформации твердого тела (рис. 2.8, б).

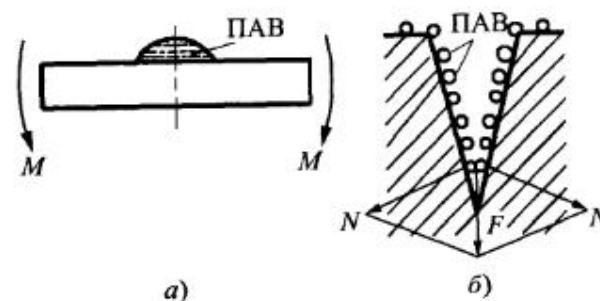


Рис. 2.8. Эффект Ребиндера:

а – внешнее проявление эффекта; б – внутреннее проявление эффекта

Отличительной особенностью эффекта Ребиндера является то, что он проявляется только при совместном действии среды и определенного напряженного состояния.

Эффект Ребиндера и его закономерности распространяются и на полимерные материалы.

Работы П.А. Ребиндера по времени совпали с работами А. Гриффитса, который в те же годы предложил одну из первых физических моделей прочности технических металлов. Он обратил внимание на два факта: практическая прочность металлов значительно ниже их теоретической прочности; в объеме металла имеется большое количество дефектов в виде внутренних и внешних трещин.

А. Гриффитс предположил, что разрушение твердого тела будет иметь место, когда приложенное к нему растягивающее напряжение достигнет критического значения $\sigma_{кр}$, вызывающего перенапряжение в вершине трещины, равное теоретической прочности металла, $\sigma_{теор} = \beta\sigma_{кр}$, где β – коэффициент концентрации напряжений (рис. 2.9).

Величина критических напряжений

$$\sigma_{кр} = \alpha \sqrt{\frac{EW}{l}},$$

где E – модуль упругости материала; W – поверхностная энергия, численно равная коэффициенту поверхностного натяжения σ ; l – длина трещины; α – коэффициент пропорциональности.

Гипотеза А. Гриффитса впоследствии была экспериментально подтверждена. Его модель получила дальнейшее развитие, органично сочетаясь с работами П.А. Ребиндера. Действительно, ПАВ, проникая в различные трещины, снижают величину поверхностной энергии W , а значит, и предельные критические напряжения, вызывающие разрушение материала.

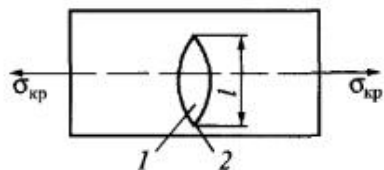


Рис. 2.9. Физическая модель прочности технических металлов (модель Гриффитса):
1 – трещина; 2 – концентратор напряжений

2.6. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ

Газы представляют конгломерат хаотически движущихся молекул, обладающих кинетической энергией. Их характерным признаком является сжимаемость и текучесть. Поведение реальных газов в объеме V описывается уравнением Ван-дер-Ваальса:

$$(p + p')(V - b) = R\theta,$$

где p , V , θ – давление, объем и температура газа; p' – молекулярное давление внутри газа; b – объем собственно молекул газа; R – универсальная газовая постоянная.

Жидкости занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами. В них отмечается некоторая упорядоченность, в которой молекулы занимают не строго фиксированное положение, а перемещаются из одного узла к другому. Объемные свойства жидкостей подчиняются уравнению:

$$p'(V - b) = R\theta.$$

Поверхностный слой жидкости отличается от ее объемного состояния, обладает поверхностной энергией и характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения σ , Н/м. Адгезионное взаимодействие между жидкостью и твердым телом на границе их раздела определяется энергией их адгезионного взаимодействия $W_{ад}$, Н·м/м²:

$$W_{ад} = \sigma_{тг} + \sigma_{жг} - \sigma_{тж},$$

где $\sigma_{тг}$, $\sigma_{жг}$, $\sigma_{тж}$ – коэффициенты поверхностного натяжения соответственно на границе раздела: твердое тело – газ, жидкость – газ, твердое тело – жидкость.

Очень важным свойством жидкости, определяющим поведение ее на поверхности твердого тела, является смачиваемость. Она характеризуется краевым углом смачивания φ , определяемым по выражению:

$$\cos \varphi = \frac{\sigma_{тг} - \sigma_{тж}}{\sigma_{жг}}.$$

Для масел краевой угол смачивания находится в пределах $0 < \varphi < 90^\circ$. При таком значении φ жидкость смачивает поверхность и стремится растечься по ней.

Поверхностное натяжение жидкости в сочетании с кривизной поверхности R создает внутри некоторого объема газа (пузырька) избыточное давление p , называемое Лапласовским давлением:

$$p = \frac{2\sigma_{жг}}{R}$$

Его величина может быть достаточно велика. Например, в пузырьке воздуха с $R = 10^{-8}$ м, находящемся в среде воды, давление может достигать 14 МПа [31]. Такие пузырьки воздуха могут разрушаться с огромной скоростью на поверхности деталей машин, вызывая при этом особый вид разрушения поверхностей – кавитационный износ (от греческого слова *cavitas* – пустота).

При сопряжении двух шероховатых тел в области их контакта образуются различные узкие зазоры, щели, трещины. Поведение жидкостей в узких капиллярах имеет свои особенности. Например, в узком вертикальном капилляре смачивающая жидкость поднимается на высоту h , преодолевая силу тяжести жидкости:

$$h = \frac{2\sigma_{жг}}{r\rho g} \cos \varphi,$$

где r – радиус капилляра; ρ – плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести.

В трибологии этот эффект используется в подшипниковых металлокерамических материалах для подачи смазки на поверхность трения. Вкладыши такого подшипника обычно предварительно пропитываются маслом, и в процессе работы за счет фрикционного разогрева, а также эффекта капиллярности частицы смазочного материала поступают в зону трения.

Глава 3

ТОПОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ И КОНТАКТ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

3.1. МАКРОГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Геометрическая форма, взаимное расположение поверхностей и размеры деталей машин обычно задаются чертежом и техническими условиями. Искажение геометрической формы или макроотклонение детали при ее изготовлении или эксплуатации приводит к повышенному и неравномерному изнашиванию деталей, снижает точность работы подвижных соединений, искажает характер посадок, вызывает контактное трение, а также создает очаги задиров и неравномерное распределение напряжений в посадках с натягом. На практике чаще всего встречаются формы отклонения цилиндрических поверхностей в продольном направлении, показанные на рис. 3.1, *a–г*, а в поперечном направлении – на рис. 3.1, *д–е*.

Технические требования к форме детали возрастают по мере повышения качества машин, их надежности и долговечности.

Непрерывное совершенствование измерительных средств открывает возможность для установления аналитических и экспериментальных зависимостей между отклонениями формы и

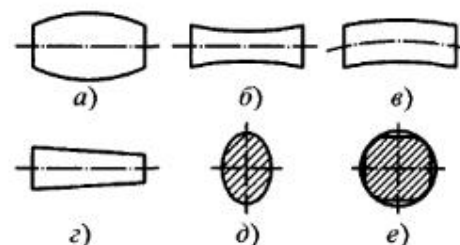


Рис. 3.1. Виды отклонений форм цилиндрических поверхностей: *a* – выпуклость; *б* – седлообразность; *в* – вогнутость; *г* – конусность; *д* – овальность; *е* – огранка

эксплуатационными свойствами сопрягаемых деталей. Это также позволяет повышать уровень существующих стандартов и совершенствовать их, учитывая не только технологию обработки и метрологию, но также выполнение деталию ее функций в машине, требования к ее надежности и износостойкости.

3.2. МИКРОГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Поверхность деталей машин в технике оценивается качеством поверхности. В свою очередь, качество поверхности определяется физико-механическими свойствами и ее микрогеометрией.

Микрогеометрия создается в процессе изготовления деталей. Она характеризуется волнистостью и шероховатостью (рис. 3.2).

Волнистость – это совокупность регулярно повторяющихся неровностей с относительно большим шагом. Обычно отношение $L/H_n = 50 \dots 1000$, где L – шаг волны, H_n – высота волны.

Шероховатость – совокупность неровностей с относительно малым шагом $l \approx 2 \dots 800$ мкм и высотой $H_{\max} \approx 0,025 \dots 320$ мкм, образующих рельеф поверхности детали и рассматриваемых на определенной базовой длине $l_0 = 80 \dots 8000$ мкм и для шероховатостей $l/H_{\max} < 50$. Следует иметь в виду, что поверхность выступов, образующих шероховатость, имеет еще шероховатость второго порядка – субмикрощероховатость, которая, однако, не нормируется из-за отсутствия достаточно надежных средств ее оценки.

Шероховатость поверхности характеризуется средним арифметическим отклонением профиля от средней линии Ra и высотой неровностей Rz .

Для определения Rz находят на участке профилограммы длиной l_0 (где l_0 – базовая длина) 5 наибольших максимумов и 5 минимумов (рис. 3.3) и рассчитывают по этим десяти точкам значения Rz :

$$Rz = \frac{1}{10} \left(\sum_1^5 |y_{i,\max}| + \sum_1^5 |y_{i,\min}| \right), \quad (3.1)$$

где y_i – расстояние расчетных точек от средней линии.

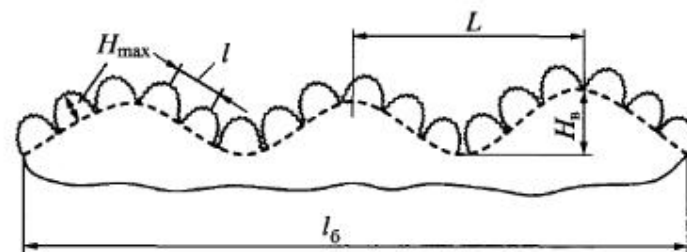


Рис. 3.2. Схема волнистости и шероховатости поверхности



Рис. 3.3. Профилограмма шероховатой поверхности

Среднее арифметическое отклонение профиля рассчитывают по формуле:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_1^n |y_i|, \quad (3.2)$$

где n – число точек профиля.

3.3. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ

Для измерения шероховатости применяется целый ряд различных методов. Однако многие методы оценивают микрогеометрию поверхности только по ее профилю. Наиболее широко используются шуповой и оптические методы.

Оптический метод основан на использовании светового сечения, когда на исследуемую поверхность проектируется под углом 45° узкая ярко освещенная щель. Так как поверхность имеет неровности, то проекция воспроизводит форму профиля. Этот профиль может быть измерен с помощью микроскопа и сфотографирован.

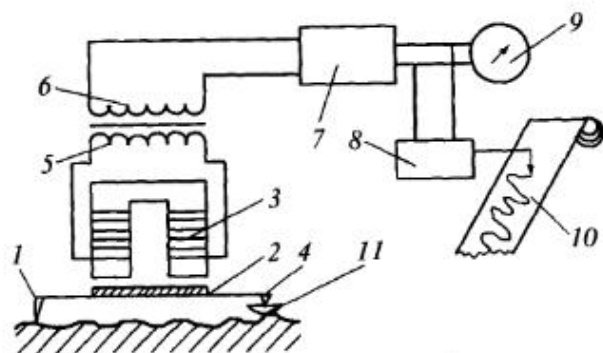


Рис. 3.4. Схема щупового прибора

Щуповой метод состоит в том, что по шероховатой поверхности перемещается игла 1 (рис. 3.4) с малым радиусом закругления (2...10 мкм). Игла соединена с якорем 2 и может вместе с ним поворачиваться относительно призмы 4, при этом меняется зазор между сердечником 3 и якорем 2.

Это приводит к изменению переменного тока в катушке 5. Ток от трансформатора 6 поступает в усилитель 7 и оттуда на самописец 8 и показывающий прибор 9. Самописец записывает на специальной бумаге 10 профилограмму исследуемой поверхности.

Призма 4 закреплена неподвижно относительно шаровой опоры 11. Поскольку шар имеет большой радиус кривизны, то он скользит по вершинам микровыступов, опускаясь и поднимаясь в соответствии с имеющейся на поверхности волнистостью. Благодаря этому можно записать шероховатость поверхности, устранив влияние волнистости. Если шаровая опора будет скользить по специально изготовленной (эталонной) очень гладкой поверхности, то игла 1 будет записывать одновременно как шероховатость, так и волнистость.

В России профилометры-профилографы, основанные на вышеописанном принципе, выпускаются серийно Московским заводом «Калибр».

3.4. РАДИУС КРИВИЗНЫ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ И КРИВАЯ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Радиус кривизны микронеровности (рис. 3.5) определяется по выражению

$$r = d^2 / 8h, \quad (3.3)$$

где d – ширина основания неровности, взятая на расстоянии $h = 0,35Ra$ от ее верхней точки.

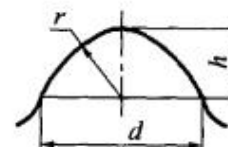


Рис. 3.5. Радиус кривизны микронеровности

Приведенный радиус $r_{прив}$ вершин неровностей профиля определяется как среднее геометрическое радиусов двух взаимно перпендикулярных направлений – поперечного и продольного:

$$r_{прив} = \sqrt{r_{поп}^2 + r_{прод}^2}$$

Диапазон измерения $r_{прив} = 5...1350$ мкм.

Профилограммы шероховатых поверхностей позволяют получить ряд характеристик микрогеометрии, весьма важных для изучения процесса трения. К их числу относится кривая опорной поверхности (рис. 3.6).

Для построения этой кривой рассекают профилограмму на некотором уровне h_1, h_2, \dots, h_i от вершины максимального выступа.

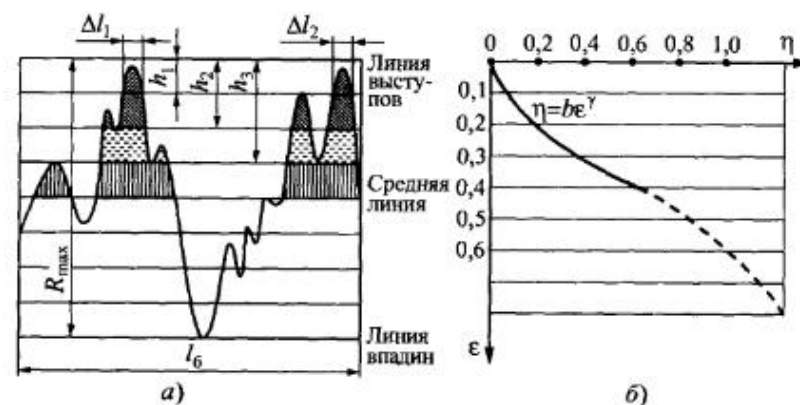


Рис. 3.6. Кривая опорной шероховатой поверхности твердого тела: а - профилограмма; б - опорная кривая

I. *Упругое оттеснение материала неровностью*, при котором контактные напряжения не превышают предела упругости. В этом случае $h/r < 0,01$ для сталей и $h/r < 0,001$ для цветных металлов.

II. *Пластическое оттеснение материала неровностью*, при котором контактные напряжения достигают предела текучести ($h/r < 0,5$).

III. *Микрорезание*, когда контактные напряжения или деформации достигают разрушающих значений ($h/r \geq 0,5$).

IV. *Адгезионное нарушение фрикционной связи*, имеющее место непосредственно на поверхности контакта твердых тел. Такой вид нарушения фрикционной связи возможен, если соблюдается правило положительного градиента механических свойств материала по глубине $d\tau/dh > 0$, т.е. нижележащие слои материала являются более прочными, чем поверхностные слои.

V. *Когезионное нарушение фрикционной связи* происходит внутри материала с вырывом некоторого микрообъема. Это возможно в том случае, когда прочность связи материала с неровностью выше прочности лежащего ниже материала $d\tau/dh < 0$.

В условиях пластического контакта происходит обтекание пластически деформируемым материалом поверхности единичной неровности более твердого тела. При определенном значении внедрения h/r и сдвигового сопротивления τ/σ_m , вызванного адгезионным взаимодействием тел, перед неровностью в объеме материала образуется застойная зона и меняется характер фрикционного взаимодействия на контакте. Пластическое оттеснение материала переходит в микрорезание. Условия его возникновения определяются неравенством:

$$\frac{h}{r} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_\tau} \right), \quad (3.7)$$

где τ – касательное напряжение среза адгезионной связи; σ_τ – предел текучести материала.

Если под действием нагрузки величина h/r превысит критическую величину, устанавливаемую неравенством (3.7), то на контакте наступит наиболее опасный вид фрикционного взаимодействия – микрорезание.

3.6. ПЛОЩАДИ КОНТАКТА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

При контакте шероховатых поверхностей различают номинальную $A_a = a \times b$, контурную A_c и фактическую A_r площади касания (рис. 3.7).

При контактировании деталей вследствие волнистости их поверхностей контур контакта будет возникать преимущественно на вершинах волн. Каждая такая область будет ограничена контуром ΔA_c , внутри которого существуют фактические пятна контакта ΔA_r .

Эти контуры удалены один от другого на расстояние шага волны L . Общая контурная площадь будет $A_c = \sum \Delta A_c$. В большинстве случаев величина контурной площади контакта A_c составляет 5...15 % величины номинальной площади контакта A_a . Фактическая площадь контакта (ФПК) $A_r = \sum \Delta A_r$ – это площадь, на которой осуществляется контакт микронеровностей, образующих шероховатость поверхности. ФПК обычно мала и занимает не более 1...10 % номинальной площади A_a . Пятна фактического контакта, образованные вследствие деформации отдельных микровыступов,

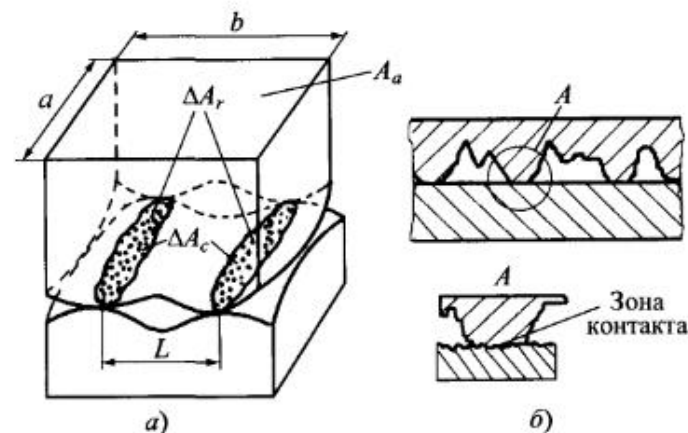


Рис. 3.7. Контакт твердых тел:

а – площади касания; б – зона фактического контакта

имеют диаметр $d_r = 10 \dots 20$ мкм. В соответствии с этим различают три вида контактных давлений:

$$p_r = F_n/A_r - \text{фактическое давление;}$$

$$p_c = F_n/A_c - \text{контурное давление;}$$

$$p_a = F_n/A_a - \text{номинальное давление,}$$

где F_n – номинальная нагрузка.

Площадь фактического контакта A_r играет исключительную роль во всех физических и химических процессах, которые могут протекать на границе раздела деталей машин.

Трение и износ, электро- и теплопроводимость контактов, жесткость стыков, контактная химическая коррозия и прочность прессовых соединений – все эти явления в решающей мере зависят от площади фактического контакта твердых тел.

При разработке физической модели для расчета площади фактического контакта тел учитываются следующие экспериментальные факты. Контакт шероховатых поверхностей имеет дискретный характер, при этом отдельные неровности по форме близки к сферическим сегментам; элементарные пятна фактического контакта возникают в результате как упругих, так и пластических деформаций; фактическая площадь касания пропорциональна приложенной нагрузке, с ростом которой увеличение площади происходит в основном за счет возникновения новых пятен контакта при сохранении среднего размера пятна в пределах $d_r = 10 \dots 20$ мкм.

При контактных давлениях, не превышающих предела текучести материала σ_T , напряженно-деформированное состояние тела определяется из решения задачи Герца о контакте упругой сферы с упругим полупространством.

В пластическое состояние материал переходит при средних нормальных давлениях на контакте в соответствии с зависимостью:

$$p_r = c\sigma_T, \quad (3.8)$$

где σ_T – предел текучести материала при одноосном напряженном состоянии; c – коэффициент, учитывающий влияние формы тела.

На основе экспериментально-теоретических исследований установлено, что для сферы $c \approx 3$, поэтому в пластическое состояние материала перейдет при

$$p_r \approx 3\sigma_T \approx \text{HB}, \quad (3.9)$$

где HB – твердость материала по Бринеллю.

При упругом контакте отдельной сферической неровности радиусом r с плоской поверхностью площадь фактического контакта ΔA_r и сближение тел a согласно теории Герца:

$$\Delta A_r = 2,82 \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{2/3} (rF_n)^{2/3}; \quad (3.10)$$

$$a = 0,82 \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{2/3} r^{-1/3} F_n^{2/3}, \quad (3.11)$$

где $E_{1,2}$ и $\mu_{1,2}$ – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов; F_n – нормальная нагрузка

В случае пластической деформации сферической неровности площадь ее контакта может быть приближенно рассчитана, исходя из предположения, что среднее нормальное давление на контакте равно твердости материала по шкале HB:

$$\Delta A_r \approx \frac{F_n}{\text{HB}}. \quad (3.12)$$

При контакте шероховатой поверхности с гладкой плоскостью площадь фактического контакта равна сумме площадок контакта ΔA_{ri} , образованных в результате деформации отдельных выступов:

$$A_r = \sum_1^n \Delta A_{ri}, \quad (3.13)$$

где n – число контактирующих выступов.

Тогда в случае *пластической* деформации неровностей

$$A_{r(\text{пл})} = \frac{1}{\text{HB}} \left(\sum_1^n F_{ni} \right) = \frac{F_n}{\text{HB}}. \quad (3.14)$$

При *упругой* деформации неровностей

$$A_{r(\text{yn})} = \int_0^n \Delta A_{ri} dn_r; \quad (3.15)$$

$$\Delta A_{ri} = \pi r a_i; \quad n_r = nb \left(\frac{a_i}{R_{\text{max}}} \right)^{v-1}, \quad (3.16)$$

где r, a – радиус и сближение неровностей под нагрузкой F_n ; R_{\max} – максимальная высота неровностей; b, v – параметры кривой опорной поверхности; n – число всех выступов на площади A_c .

Подставляя в (3.15) выражения (3.11), (3.16) и интегрируя уравнение (3.15), получим при $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ и $E_1 = E_2 = E$:

$$A_{r(y)} = \left[\frac{2,35b^{1/2v} A_c^{1/2v} (1-\mu^2)r^{1/2} F_n}{2^{1/2v} K_1 R_{\max}^{1/2} E} \right]^{2v}, \quad (3.17)$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от v .

Для того чтобы перейти к контакту двух шероховатых поверхностей, рекомендуется вместо v, b, R_{\max}, r для одной поверхности подставить их эквивалентные значения $v_{\Sigma}, b_{\Sigma}, R_{\max\Sigma}, r_{\Sigma}$, учитывая свойства двух тел [1]:

$$v_{\Sigma} = v_1 + v_2; \quad R_{\max\Sigma} = R_{\max 1} + R_{\max 2}; \quad r_{\Sigma} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2};$$

$$b_{\Sigma} = \frac{K_2 b_1 b_2 R_{\max\Sigma}}{R_{\max 1}^{v_1} + R_{\max 2}^{v_2}}, \quad (3.18)$$

где K_2 – коэффициент, зависящий от v_1 и v_2 .

Глава 4

ПРИРОДА И ВИДЫ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ

По кинематическим признакам различают трение покоя, скольжения и качения (рис. 4.1).

Силой трения покоя называют тангенциальную силу, прикладываемую к покоящимся телами и не вызывающую их скольжение (рис. 4.1, а).

При трении скольжения сопряженные тела перемещаются поступательно и относительные скорости различных точек перемещающегося тела одинаковы (рис. 4.1, б).

При трении качения одно тело перекачивается по другому и относительные скорости разных точек катящегося тела различны (рис. 4.1, в). В то же время известно, что реальные тела, обладающие упругостью, контактируют не в точке, а на некоторой площадке. Поэтому иногда оба вида трения проявляются совместно.

В зависимости от наличия смазки и характера ее поведения в трибосопрежении различают следующие режимы трения: сухое, граничное, жидкостное и газо- или гидродинамическое.

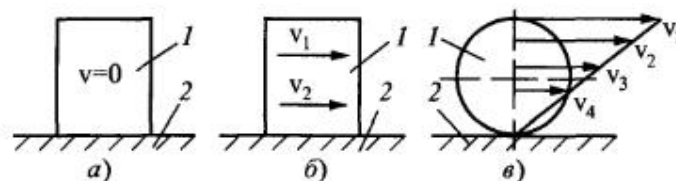


Рис. 4.1 Виды внешнего трения:

а – покоя; б – скольжения; в – качения

4.1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА (СУХОЕ ТРЕНИЕ)

Сухое трение имеет место при отсутствии смазочного материала между трущимися поверхностями только в вакууме. Условно сухое трение при наличии адсорбированных пленок на поверхности твердого тела встречается в тормозах, фрикционных передачах и муфтах, работающих всухую, в узлах трения текстильной, пищевой и химической промышленности, где смазка во избежание порчи продукции либо по соображениям безопасности недопустима.

Внешнее трение – явление, обусловленное сложным физико-механическим и механохимическими процессами, протекающими в зонах фактического касания твердых тел. Природа внешнего трения двойственная. Она обусловлена рассеиванием энергии при преодолении сил молекулярного взаимодействия в зонах фактического контакта и затратами энергии на преодоление механического сопротивления, связанного с деформацией трущихся поверхностей. Мерой оценки трения служит коэффициент трения f , который определяется как отношение силы сопротивления относительному перемещению двух тел при трении $F_{тр}$ к нормальной составляющей реакции внешних сил F_n , действующих на поверхность тела:

$$f = F_{тр} / F_n. \quad (4.1)$$

Но не всегда правильно задаваться значением f , пользуясь справочниками, где не указаны режимы и условия, при которых этот коэффициент получен. Приводимые в справочниках данные коэффициента трения, если не оговариваются условия их получения, часто являются ориентировочными, ибо в зависимости от условий трения коэффициент трения одной и той же пары может изменяться в широких пределах.

В настоящее время одной из наиболее развитых теорий трения является молекулярно-механическая теория трения [6, 23]. Ее основы были созданы в XX веке трудами ученых: Б.В. Дерягина, И.В. Крагельского, Ф. Боудена, Д. Тейбора и др.

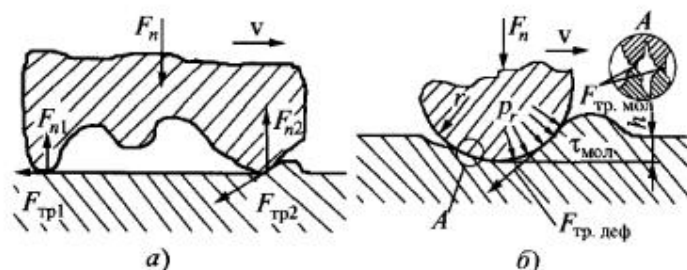


Рис. 4.2. Контакт двух шероховатых тел:

a – сила трения, возникающая при контактом взаимодействии двух неровностей; b – контакт жесткой сферы с деформированным телом; F_n – нормальная нагрузка; $F_{тр}$ – сила трения; $\tau_{мол}$ – касательное напряжение среза; r и h – радиус неровности и глубина ее внедрения; $\Delta F_{тр, мол}$ и $\Delta F_{тр, деф}$ – молекулярная и деформационная составляющие силы трения, действующие на отдельную неровность

Существенным для понимания трения твердых тел в соответствии с молекулярно-механической теорией является то, что вследствие шероховатости и волнистости поверхностей контактирование всегда дискретно, т.е. происходит в отдельных пятнах контакта. Механическое взаимодействие обусловлено взаимным внедрением отдельных точек касания. Одна поверхность внедряется в другую не только за счет имевшейся шероховатости, но и деформации, образующейся под нагрузкой вследствие анизотропии механических свойств (рис. 4.2).

Молекулярное взаимодействие обусловлено взаимным притяжением поверхностей двух тел. Так как оно меняется обратно пропорционально 4-й степени расстояния, то практически молекулярное притяжение или пренебрежимо мало, или такое, что приводит к образованию прочной связи в объеме и может быть разрушено только при сдвиге.

Суммарная величина силы трения:

$$F_{тр} = F_{тр, мол} + F_{тр, деф} = \sum_1^{n_1} \Delta F_{тр, мол} + \sum_1^{n_2} \Delta F_{тр, деф}, \quad (4.2)$$

где $\Delta F_{\text{тр.мол}}$ и $\Delta F_{\text{тр.деф}}$ – молекулярная (адгезионная) и деформационная составляющие силы трения, действующие на отдельную неровность, внедрившуюся на глубину h (рис. 4.2, б) и движущуюся по деформируемому телу.

Разделив левую и правую части уравнения на нормальную нагрузку F_n , получим выражение для коэффициента трения, равного сумме его молекулярной и деформационной составляющих:

$$f = f_{\text{мол}} + f_{\text{деф}} = \frac{\sum_1^{n_1} \Delta F_{\text{тр.мол}}}{F_n} + \frac{\sum_1^{n_2} \Delta F_{\text{тр.деф}}}{F_n} = \frac{F_{\text{тр.мол}}}{F_n} + \frac{F_{\text{тр.деф}}}{F_n}. \quad (4.3)$$

Определим эти составляющие для случая внедрения отдельной микронеровности (см. рис. 4.2, б).

Молекулярная составляющая. При рассмотрении этой задачи полагаем, что сдвиговое сопротивление молекулярной связи τ пропорционально времени оседлой жизни частицы t :

$$\tau = at, \quad (4.4)$$

где a – коэффициент пропорциональности.

Уравнение Френкеля для времени оседлой жизни частицы:

$$t = t_0 \exp\left(\frac{u'}{kT}\right), \quad (4.5)$$

где $t_0 = 10^{-12}$ с – постоянная времени; u' – энергия активации молекулярной связи; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана.

В условиях трения, когда имеется касательная и нормальная нагрузка на фрикционном контакте, энергию активации можно представить как сумму:

$$u' = u + \gamma p_r, \quad (4.6)$$

где u – энергия активации; γ – постоянная; p_r – фактическое давление на контакте.

Тогда уравнение (4.4) с учетом (4.5) и (4.6) будет иметь вид:

$$\tau = at_0 \exp\left[\frac{(u + \gamma p_r)}{kT}\right]. \quad (4.7)$$

После разложения уравнения (4.7) в ряд будем иметь

$$\tau = at_0 \left(1 + \frac{u}{kT} + \frac{\gamma p_r}{kT}\right). \quad (4.8)$$

Введем обозначения

$$at_0 + at_0 \frac{u}{kT} = \tau_0; \quad at_0 \gamma / kT = \beta.$$

Тогда получим

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r. \quad (4.9)$$

Разделим правую и левую части этого уравнения на p_r , получим значение молекулярной составляющей коэффициента трения для отдельной неровности:

$$f_{\text{мол}} = (\tau_0 / p_r) + \beta, \quad (4.10)$$

где τ_0 – напряжение среза молекулярной связи; β – пьезокоэффициент.

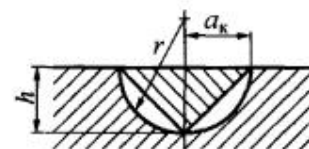
Эти параметры являются характеристиками поверхностного слоя материалов и зависят от пленок, которые покрывают поверхность контактирующих тел. Для большинства металлов и полимеров $\tau_0 = 0,2 \dots 30$ МПа, $\beta = 0,02 \dots 0,15$ [23].

Деформационная составляющая. Принимаем, что площадь сечения, перпендикулярная к направлению движения неровности, будет в первом приближении равна площади вписанного треугольника $A = ha_k$ (рис. 4.3).

Если предел текучести материала плоскости σ_t будет соответствовать напряжению, действующему на неровность в направлении движения, то деформационная составляющая силы трения будет

$$F_{\text{тр.деф}} = ha_k \sigma_t. \quad (4.11)$$

Рис. 4.3. Схема контакта:
 a_k – радиус пятна контакта;
 h – глубина внедрения; r – радиус неровности в виде сферического сегмента



Нормальная нагрузка на такую неровность

$$F_n = \frac{\pi a_k^2 \sigma_n}{2}, \quad (4.12)$$

где σ_n – нормальное напряжение (перпендикулярное к направлению движения).

Тогда при условии, что $\sigma_n \approx \sigma_T$, получим деформационную составляющую коэффициента трения:

$$f_{\text{деф}} = \frac{F_{\text{тр.деф}}}{F_n} = \frac{2h}{\pi a_k}, \quad (4.13)$$

или с учетом, что радиус сегмента $a_k = \sqrt{2hr}$, получим окончательно

$$f_{\text{деф}} = k \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (4.14)$$

где $k = 0,55\alpha$ – при пластическом контакте; $k = 0,19\alpha$ – при упругом контакте (α – коэффициент гистерезисных потерь материала).

Общий коэффициент трения для единичной неровности будет иметь вид

$$f = f_{\text{мол}} + f_{\text{деф}} = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + k \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (4.15)$$

где τ_0 – удельная сдвиговая прочность молекулярной связи; p_r – давление на площади фактического контакта; β – коэффициент упрочнения молекулярных связей под воздействием нормальных сжимающих напряжений (пъезокоэффициент); h – глубина внедрения неровности; r – радиус неровности.

Анализ выражения (4.15) показывает, что с увеличением нагрузки возрастает фактическое давление p_r при упругом контакте и, следовательно, уменьшается молекулярная составляющая коэффициента трения (первые два слагаемых). Одновременно увеличивается внедрение h неровности, вследствие чего увеличивается деформационная составляющая коэффициента трения. В общем случае f проходит через минимум и существует некоторое оптимальное значение давления $p_{r \text{ опт}}$, соответствующее этому минимуму (рис. 4.4).

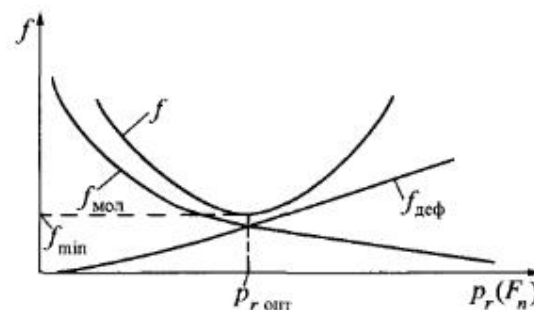


Рис. 4.4. Зависимость коэффициента трения от нагрузки

Уменьшение Rz приводит к росту A_r и увеличению $f_{\text{мол}}$. Увеличение высоты выступов и, как следствие, уменьшение радиуса закругления их вершин приводит к росту деформационной составляющей силы трения.

При увеличении температуры, с одной стороны, уменьшается прочность молекулярных (адгезионных) связей, но, с другой стороны, увеличивается пластичность контакта и, следовательно, его площадь. Отсюда f увеличивается.

Температура в зоне контакта существенно зависит от скорости скольжения v . В общем случае зависимость коэффициента трения от скорости проходит через максимум, положение которого зависит от давления p_r на контакте. Наличие максимума объясняется гистерезисными потерями, возникающими в деформируемом материале при трении.

Так как фрикционный контакт неоднороден и дискретен, то сила трения для реальных тел представляет собой сумму элементарных сил трения, возникающих на отдельных площадках касания.

На практике при переходе от одного вида нагружения фрикционной связи к другому коэффициент трения обычно изменяется. При расчете f необходимо учитывать вид контакта: упругий, пластический (ненасыщенный или насыщенный) или упругопластический.

Упругий контакт имеет место в трибосопряжениях, когда действующая нагрузка и сила молекулярного взаимодействия не приводят к возникновению в поверхностных слоях материалов деталей напряжений, превышающих предел текучести материала.

Пластический контакт характеризуется контактными напряжениями, превышающими предел текучести материала, что приводит к внедрению единичных неровностей в поверхность, обладающую меньшей твердостью.

По числу контактирующих неровностей различают насыщенный и ненасыщенный контакт.

Насыщенным называют контакт двух шероховатых поверхностей, при котором число контактирующих неровностей равно числу неровностей, расположенных на контурной площади касания. Насыщенный контакт характерен для условий скольжения шероховатой поверхности большей твердости по ровной поверхности материала, обладающей меньшей шероховатостью и меньшей твердостью.

Ненасыщенный контакт возникает, когда число контактирующих неровностей меньше числа неровностей, расположенных на контурной площади касания. Он возникает при трении тел, твердость которых различается незначительно. Подавляющее большинство трибосопряжений машин работают при упругопластических деформациях и в условиях пластического ненасыщенного или насыщенного контакта.

Учитывая характер фрикционного взаимодействия, И.В. Крагельский и Н.М. Михин рекомендуют для пластического контакта коэффициент трения определять при условии $p_r \approx \text{HB}$ [24]:

$$f = \frac{\tau_0}{\text{HB}} + \beta + 0,5\alpha \sqrt{\frac{h}{r}}. \quad (4.16)$$

Определить точно коэффициент трения, используя выражение (4.16), не представляется возможным вследствие слабой изученности процесса силового взаимодействия твердых тел при упругопластических деформациях материала в зоне контакта, что не позволяет с достаточной точностью установить величину внедрения неровностей трущихся поверхностей.

В инженерных расчетах при определении коэффициента трения деталей, работающих в условиях пластического ненасыщенного контакта, используют формулу [24]:

$$f = \frac{\tau_n}{\text{HB}} + 0,44\Delta^{1/2} \left(\frac{2p_c}{\text{HB}} \right)^{1/4}, \quad (4.17)$$

где τ_n – касательные напряжения, возникающие в поверхностных слоях материала в результате молекулярного взаимодействия; p_c – контурное давление; Δ – комплексная характеристика шероховатости поверхности:

$$\Delta = R_{\max} / (rb^{1/2}).$$

Первое слагаемое формулы (4.17) характеризует молекулярную составляющую, а второе слагаемое – деформационную составляющую коэффициента трения.

Коэффициент трения деталей, работающих в условиях насыщенного пластического контакта [24]:

$$f = \frac{\tau_n}{\text{HB}} + 0,76 \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^{1/2} \left(\frac{p_c}{\text{HB}} \right)^{1/2}. \quad (4.18)$$

Для приближенного расчета коэффициента внешнего трения тяжело нагруженных трибосопряжений, работающих в условиях пластического контакта, может быть использовано выражение [24]:

$$f = \frac{0,65[10 + \lg(60 \cdot 10^4 (Rz / E_{\text{пр}}) \rho_{\text{пр}})]}{\mu^{0,07} v_{\Sigma}^{0,12} v_{\text{ск}}^{0,2}}, \quad (4.19)$$

где $\rho_{\text{пр}}$ – приведенный радиус кривизны поверхности; $E_{\text{пр}}$ – приведенный модуль упругости; μ – кинематическая вязкость смазки при 50 °С; v_{Σ} – суммарная скорость качения ($v_{\Sigma} = v_1 + v_2$); $v_{\text{ск}}$ – скорость относительного проскальзывания трущихся поверхностей.

Особенности трения в вакууме. Внешнее трение в глубоком вакууме приводит к прочному сцеплению двух поверхностей – их сварке. Жидкая смазка под влиянием атомарного кислорода и водорода существенно изменяется. Отдельные ингредиенты смазки, имеющие различное парциальное давление, избирательно испаряются. Состав смазки ухудшается. Коэффициент трения в вакууме возрастает. Теплообразование при трении растет, так как отсутствует газовая или жидкая среды и тепло не может отводиться от пары трения конвективным путем. Все это приводит к перегреву и заеданию деталей в сопряжении. Одинаковые по природе материа-

лы, особенно пластичные, оказываются в вакууме неработоспособными, происходит их схватывание.

Проблема обеспечения работы узлов трения в вакууме есть проблема создания на поверхности трения устойчивой защитной пленки. Пленка нужна, чтобы исключить чистый металлический контакт.

Кинетика образования мономолекулярной пленки на поверхности деталей в зависимости от степени вакуума выглядит следующим образом.

Степень вакуума	10^{-6}	10^{-10}	10^{-11}
Время образования пленки	2,5 с	7 ч	70 ч

Целесообразно применение пленок из твердого вещества. Так, например, одно из тел сопряжения необходимо покрывать одним из металлов: оловом, серебром, кадмием, золотом или свинцом. Для трибосопряжений очень полезными являются самосмазывающиеся композиции на основе меди или серебра с наполнением MoS_2 , WS_2 , NbSe_2 , графиты и др.

4.2. ТРЕНИЕ ПРИ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКЕ

Это один из видов внешнего трения, при котором трение и износ между телами, находящимися в относительном движении, определяется свойствами поверхностей и свойствами смазочного материала, отличных от объемных.

Большой вклад в изучение процессов трения при граничной смазке внесли В. Гарди, Ф. Буден, Ю.В. Дерягин, А.С. Ахматов и др.

При граничной смазке поверхность сопряженных тел разделена слоем смазочного материала весьма малой толщины (от толщины одной молекулы до 0,1 мкм). Эта пленка весьма прочно связана с металлической подложкой силами молекулярного взаимодействия и поэтому теряет свойства, присущие жидкости в большом объеме, где частички жидкости могут свободно перемещаться относительно друг друга; сопротивление движению жидкости определяется внутренним трением.

Наличие граничного слоя (пленки) снижает силы трения по сравнению с трением без смазки в 2–10 раз, уменьшает износ сопряженных поверхностей в сотни раз. Все масла способны адсорбироваться на металлической поверхности. Благодаря подвижности молекул смазочного материала на поверхности трения адсорбция протекает с большой скоростью, что придает смазочной пленке свойство «самозалечиваться» в местах ее повреждения.

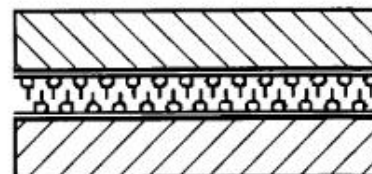


Рис. 4.5. Схема идеального граничного слоя

Эффективность смазочного действия, помимо фактора адсорбции, зависит от химического взаимодействия металла и смазочного материала. Жирные кислоты, входящие в качестве присадок в масла, вступают в реакцию с металлом, образуют мыла, способные выдерживать без разрушения значительные деформации. Это подтверждается тем, что инертные металлы (платина, золото, серебро) и стекло плохо смазываются. Молекулы смазочного материала обычно ориентируются перпендикулярно к твердой поверхности, что позволяет представить для наглядности граничную пленку в виде ворса (рис. 4.5).

Формирование граничных слоев смазки происходит в следующей последовательности. Вначале на активных центрах твердой поверхности, имеющей заряды разных знаков, закрепляются одиночные молекулы ПАВ. Например, молекулы жирных кислот $(\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{COOH})$ своими полярно-активными группами COOH вступают в контакт с активными центрами поверхности. Хвостовые части молекул, состоящие из метиленовых групп CH_2 и инертных метильных групп CH_3 , выстраиваются перпендикулярно поверхности. Постепенно число таких молекул увеличивается, и они образуют сплошной молекулярный ворс первичного монослоя (рис. 4.6).

Между полярными группами COOH могут возникнуть дополнительные связи, которые упрочняют граничный слой. Вслед за первым монослоем формируется второй, третий и т.д., до 20...50 слоев.

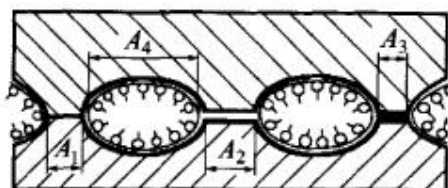


Рис. 4.6. Схема реального граничного слоя:

- A_1 – металлический контакт;
- A_2 – мономолекулярный слой;
- A_3 – контакт окислов;
- A_4 – полимономолекулярный слой

Энергия связи между элементами внутри молекул и концевыми группами отдельных молекул между собой не одинаковы. В молекулах жирных кислот, например, они больше всего в полярных группах COOH (336 кДж/моль), слабее – в метильных цепях (52 кДж/моль), и совсем слабые взаимодействия между концевыми метильными группами CH_3 соседних слоев (4 кДж/моль). Весьма слабая связь между хвостами молекул смежных слоев определяет легкое скольжение при граничном трении между пленками, принадлежащими твердым телам.

При взаимном перемещении поверхностей трения «ворсинки» как бы изгибаются в противоположные стороны.

Смазочный материал в граничном слое анизотропен, в тангенциальном направлении молекулярные слои легко изгибаются и скользят друг по другу; по нормали к твердой поверхности пленка обладает высоким сопротивлением сжатию.

Механизм трения при граничной смазке представляется в следующем виде. Под нагрузкой происходит упругая и пластическая деформации на площадках контакта, на которых может реализовываться взаимное внедрение поверхностей без нарушения целостности смазочной пленки. Сопротивление движению при скольжении складывается из сопротивления сдвигу граничного слоя и сопротивления «пропахиванию» поверхностей внедрившимися объемами. Кроме того, на площадках контакта A_1 может произойти временное разрушение смазочной пленки и даже схватывание металлов на микрошероховатостях (см. рис. 4.6). Это будет вызывать дополнительное сопротивление движению. В дальнейшем, благодаря адсорбции, такие металлические участки снова покрываются смазочным слоем, т.е. «залечиваются», и т.д.

Сила трения и коэффициент трения при граничной смазке зависят от ряда факторов [1, 24, 43]. Прочность пленки зависит от молекулярных свойств граничной пленки, свойств контактирующих поверхностей и от температуры. Наиболее чувствителен к колебаниям температуры параметр $f_{\text{мол}}$. С уменьшением температуры величина $f_{\text{мол}}$ уменьшается. При увеличении шероховатости коэффициент трения переходит через минимум, причем чем тоньше пленка смазки, тем влияние этого параметра выражается более отчетливо (рис. 4.7).

Чем меньше радиус волнистости, тем тоньше пленка смазочного материала, находящегося на вершинах волн (рис. 4.8, а). При увеличении радиуса волнистости в трении участвуют все более

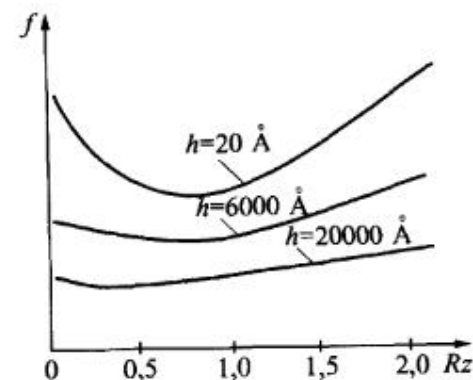


Рис. 4.7. Влияние Rz на величину коэффициента трения

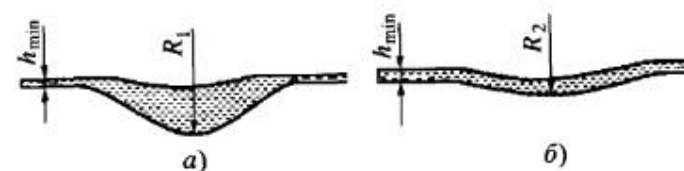


Рис. 4.8. Влияние радиуса волнистости на толщину пленки смазочного материала ($R_1 < R_2$):
а – тонкая пленка; б – толстая пленка

толстые пленки (рис. 4.8, б), что соответственно понижает коэффициент трения. При граничном трении скольжения минимальному трению соответствует оптимальная шероховатость порядка $Rz = 0,1$ мкм.

Влияние скоростей скольжения на коэффициент трения отражено на рис. 4.9 и 4.10. При этом на рис. 4.9 показано влияние малых скоростей и толщины граничного слоя, а на рис. 4.10 – повышенных скоростей и давления.

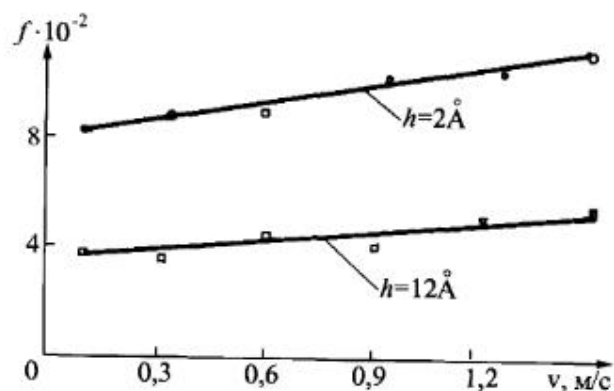


Рис. 4.9. Влияние низких скоростей скольжения на коэффициент трения: h – толщина граничного слоя

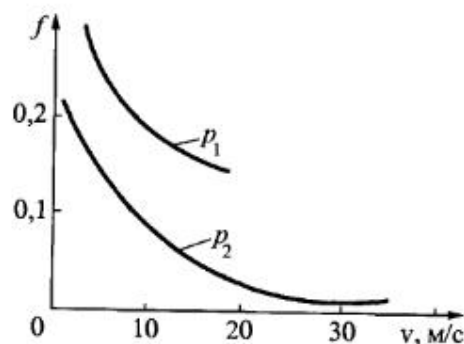


Рис. 4.10. Влияние повышенных скоростей и давления на коэффициент трения ($p_1 > p_2$)

Например, при увеличении скорости более 10 м/с температура в контакте ствол–снаряд повышается. Медный поясok снаряда размягчается и это создает условия для увеличения толщины пластичной пленки смазочного материала на контакте и, соответственно, резкого снижения коэффициента трения.

Скорость скольжения, м/с	10	85	340	720	800
Коэффициент трения	0,27	0,052	0,031	0,022	0,022

При увеличении нагрузки коэффициент трения уменьшается [1, 6, 23, 42]. Падение коэффициента трения с ростом давления объясняется тем, что при увеличении нагрузки толщина пленки смазочного материала уменьшается. Поскольку тонкие слои смазки имеют большее сопротивление на сдвиг, сила трения увеличивается, однако медленнее, чем растет нагрузка (рис. 4.11).

Начиная с точки B , утончение пленки прекращается. На участке AB имеется достаточно толстый слой смазки, вследствие чего в этом слое молекулы жидкости не связаны так прочно с твердым телом. Косвенным доказательством этого является то, что при увеличении температуры коэффициент трения значительно изменяется на участке BC .

В ряде случаев наблюдается рост коэффициента трения при увеличении нагрузки. Это объясняется тем, что граничное трение в отдельных точках фактического контакта переходит в сухое трение. Коэффициент трения падает по мере приближения к точке плавления смазки и резко возрастает при переходе к смазке с низкой вязкостью η (рис. 4.12).

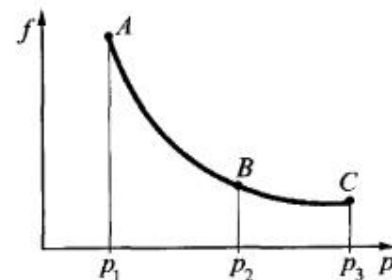


Рис. 4.11. Влияние давления на величину коэффициента трения

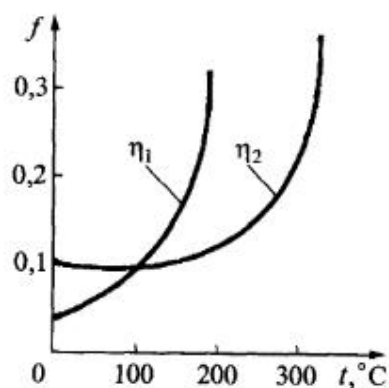


Рис. 4.12. Влияние температуры на коэффициент трения ($\eta_1 < \eta_2$)

Положительный градиент механических свойств поверхностного слоя можно обеспечить за счет снижения прочности поверхностного слоя самых твердых тел. Снижение прочности и образование на поверхности рыхлой механически слабой пленки имеет место в условиях действия сред, содержащих ПАВ. Это явление называют эффектом Ребиндера. Он обусловлен миграцией (распространением) молекул ПАВ вдоль стенок микротрещин, всегда имеющих на поверхности твердых тел. Характерной чертой этого является то, что движение молекул по мере продвижения их к устью трещин все более затрудняется, так как трещина сужается, а расклинивающее давление в ней возрастает. Трение интенсифицирует проявление эффекта Ребиндера, поскольку поверхностные слои при этом подвергаются циклическим перемещенным напряжениям, ускоряющим разрушение (разрыхление) поверхностного слоя.

В.И. Костецкий экспериментально установил, что применение ПАВ особенно перспективно в сочетании с химическими компонентами, устраняющими влияние кислорода из воздуха или смазки. Оксидные пленки на металле снижают эффективность действия ПАВ.

В основе эффекта Ребиндера лежит физическая, а не химическая адсорбция. Поэтому эффект уменьшается с повышением температуры, что связано с переходом от физической адсорбции к химической. Добавка химически активных присадок в масла способствует протеканию физической адсорбции и подавлению химической.

4.3. ЖИДКОСТНОЕ ТРЕНИЕ

Жидкостное трение характеризуется тем, что трущиеся поверхности разделены слоем смазки h_{\min} , который воспринимает приложенную нормальную нагрузку (рис. 4.13). В этом случае внешнее трение твердых тел заменяется внутренним трением слоев жидкости. Для жидкостного трения $h_{\min} > (Rz_1 + Rz_2)$ рабочий зазор должен быть $h_{\text{раб}} = h_{\min} / (Ra_1 + Ra_2)$. Практикой выработан следующий критерий для жидкостного трения: $5 \leq h_{\text{раб}} \leq 100$.

Внешнее трение всегда сопровождается преобразованием кинетической энергии в тепло, т.е. является диссипативным процессом. В этом сходство внешнего и внутреннего трения.

Различие внешнего и внутреннего трения заключается в следующем:

а) в геометрии взаимодействия трущихся поверхностей. При внешнем трении соприкосновение двух твердых тел происходит в отдельных точках, контакт дискретен, а площадь фактического контакта зависит от нагрузки;

б) внутреннее трение характеризуется ламинарным перемещением материала в направлении вектора относительной скорости. При внешнем трении материал перемещается в направлении, перпендикулярном вектору относительной скорости;

в) при внешнем трении возникновение и разрушение связей локализуется в тонком поверхностном слое. При внутреннем трении деформативная зона охватывает весь объем;

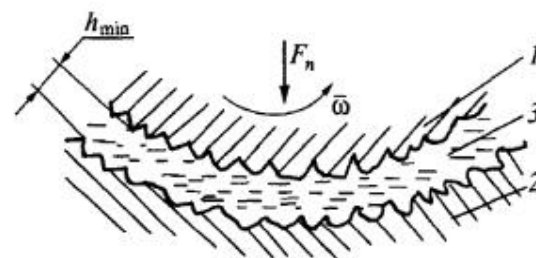


Рис. 4.13. Схема трибосопряжения с жидкостной смазкой: 1 – вал; 2 – подшипник; 3 – слой смазки

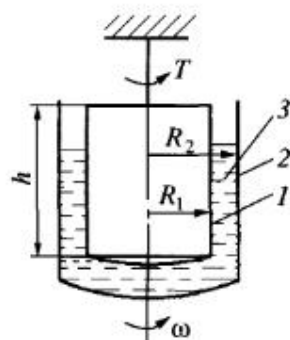


Рис. 4.14. Вискозиметр ротационный:

- 1 – вращающийся цилиндр;
2 – неподвижный цилиндр;
3 – слой смазочного материала

г) природа внутреннего трения едина. Она связана с передачей количества движения от одного слоя (частицы) к другому. Природа внешнего трения двойственная: ($f = f_{\text{мол}} + f_{\text{деф}}$).

Движение молекул внутри твердых тел, жидкостей и газов приводит к рассеиванию внутренней энергии вследствие столкновений, растяжения, кручения, колебаний и скольжения молекул. Это явление называют внутренним трением, и оно может принимать различные формы в зависимости от фазового состояния. В твердых телах – петля гистерезиса, в жидкостях и газах внутреннее трение проявляется как вязкость.

Вязкость – это физическое свойство жидкости, заключающееся в способности оказывать сопротивление относительно движению или деформации молекул. В 1669 году И. Ньютон провел известные эксперименты с вращением цилиндра радиусом R_1 , расположенного внутри неподвижного цилиндра большего диаметра с радиусом R_2 . Пространство между ними заполнялось различными жидкостями (рис. 4.14).

Ньютоном было установлено, что при вращении внутреннего цилиндра с постоянной угловой скоростью ω к нему надо приложить момент, величина которого зависит от этой скорости, расстояния между цилиндрами ($R_2 - R_1$) и типа исследуемой жидкости. Впоследствии эти результаты были обобщены в виде закона вязкого течения Ньютона, который гласит: сила внутреннего трения F_v , проявляющаяся при перемещении одного слоя жидкости

относительно другого, прямо пропорциональна градиенту относительной скорости этого перемещения и площади слоя жидкости:

$$F_v = \eta A \frac{dv}{dh}. \quad (4.20)$$

Если разделить левую и правую части уравнения (4.20) на площадь A , то получим

$$\tau = \eta \frac{dv}{dh} \approx \eta \frac{v}{h}, \quad (4.21)$$

где τ – сопротивление сдвигу между слоями жидкости; $\eta (dv/dh) \approx \eta (v/h)$ – градиент скорости при $p = \text{const}$ и $T = \text{const}$.

Кривые, изображенные на рис. 4.15, называются реологическими. Они учитывают зависимость касательного напряжения в слое жидкости от типа жидкости.

Жидкости, у которых τ линейно зависит от v/h , а η есть величина постоянная, называются ньютоновскими жидкостями (см. рис. 4.15, кривая 1). К их числу относится вода и большинство базовых масел.

Многофазные жидкости относятся к классу неньютоновских жидкостей и описываются более сложными зависимостями. В частности, кривая 2 на рис. 4.15 описывается уравнением

$$\tau = K \left(\frac{v}{h} \right)^n, \quad (4.22)$$

а кривая 3

$$\tau = \tau_{\text{пр}} + \eta_p \frac{v}{h}, \quad (4.23)$$

где $\tau_{\text{пр}}$ – предельное напряжение сдвига; η_p – коэффициент жесткости при сдвиге; K и n – коэффициенты, зависящие от типа жидкости.

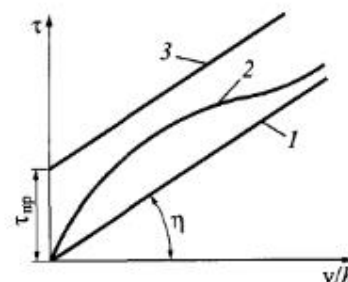


Рис. 4.15. Реологические кривые для различных типов жидкостей:

- 1 – ньютоновская жидкость;
2 и 3 – неньютоновские жидкости

Коэффициент пропорциональности η (см. рис. 4.15) зависит от природы жидкости и является одной из важнейших ее характеристик как коэффициент динамической вязкости.

Коэффициент динамической вязкости — это сила трения в N при относительной скорости скольжения в 1 м/с двух слоев жидкости, имеющих площадь 1 м^2 и удаленных друг от друга на расстояние 1 м . Практически это коэффициент жидкостного трения, имеющий размерность $\frac{N \cdot c}{\text{м}^2} = \text{Па} \cdot c$. В технике используется также и кинематическая вязкость:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (4.24)$$

где ρ — плотность жидкости.

Измеряют кинематическую вязкость в $\text{м}^2/\text{с}$, чаще всего приборами ротационного капиллярного типа. Принципиальная схема ротационного вискозиметра представлена на рис. 4.16.

В вискозиметрах капиллярного типа вязкость оценивается по времени перетекания стандартного объема жидкости из резервуара A в резервуар B через капиллярный участок длиной h .

Вначале оценивается условная вязкость [31]:

$$B\nu = \frac{t}{t_{\text{эт}}}, \quad (4.25)$$

где t — время истечения 200 см^3 исследуемого масла; $t_{\text{эт}}$ — время истечения эталонной жидкости.

Затем рассчитывается кинематическая вязкость

$$\nu = A(B\nu) - \frac{B}{(B\nu)}, \quad (4.26)$$

где A и B — постоянные коэффициенты, зависящие от конструкции вискозиметра.

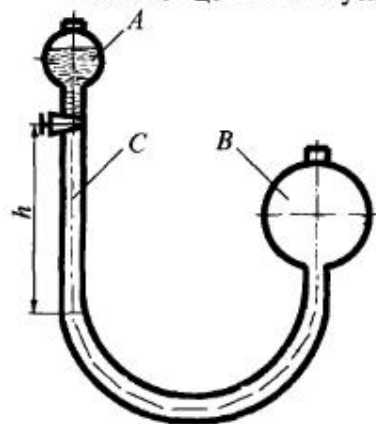


Рис. 4.16. Вискозиметр капиллярный

Разделение трущихся поверхностей слоем жидкости (масла) достигается следующими способами:

а) гидростатическим способом путем принудительной прокачки масла в зазор под давлением;

б) посредством гидродинамического эффекта.

Первый метод используется для отдельных узлов трения, например, в гидростатическом подпятнике. На рис. 4.17 представлена схема такого подпятника, жидкостное трение в котором осуществляется за счет масла, подаваемого в зазор между пятой 1 и подпятником 2 специальным насосом высокого давления. Давление в зазоре поддерживается все время постоянным, обычно не ниже $15 \dots 20 \text{ МПа}$. Для этих целей устанавливается специальное уплотнение 3 и устройство для поддержания заданного давления. В этом случае вал 4 как бы всплывает, а пята 1 , окруженная со всех сторон слоем масла высокого давления, будет испытывать жидкостное трение при повороте вала.

Потери на трение в этом случае будут минимальные. Однако гидростатические подпятники и подшипники имеют очень существенные недостатки, ограничивающие их применение. Для большинства таких подшипников и подпятников скольжения необходимо наличие специальных уплотнительных устройств, специальных насосных станций, а при умеренных и высоких скоростях вращения вала — специальной системы охлаждения узла трения и др.

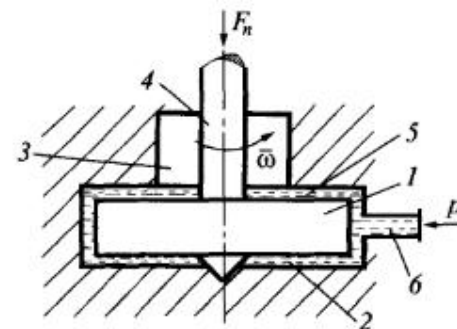


Рис. 4.17. Схема гидростатического подпятника:

1 — пята; 2 — подпятник;
3 — специальное уплотнительное устройство;
4 — вал; 5 — слой жидкости высокого давления; 6 — система подачи масла

На практике используется в основном гидродинамический эффект. Основы гидродинамической теории смазки созданы трудами Н.П. Петрова и О. Рейнольдса. В 1883 г. Н.П. Петров обосновал физические принципы гидродинамического эффекта. При проведении экспериментов он установил, что при уменьшении угловой скорости вала ω под влиянием нагрузки толщина масляного слоя h в подшипнике скольжения уменьшается, и по форме этот слой отличается от кольцевого.

Гидродинамический эффект возникает вследствие затягивания в сужающийся зазор масла под влиянием трения о движущиеся стенки вала и подшипника. В этом случае внутри масляного клина возникает добавочное давление, способное уравновесить плавающий вал.

В 1886 г. О. Рейнольдс на основе законов гидромеханики получил уравнение несущей способности гидродинамического вязкого слоя в дифференциальной форме:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta v \frac{h - h_0}{h^3}, \quad (4.27)$$

где $h_0 \approx h_{\min}$ и h – зазоры между деталями.

Большинство трущихся деталей имеют криволинейные поверхности, поэтому в них относительно просто реализуется эффект гидродинамического жидкостного трения, показанный на рис. 4.18 на примере подшипника скольжения.

Вал диаметром d вращается с угловой скоростью ω . При некоторой критической скорости $\omega_{кр}$ между поверхностью вала и втулки образуется непрерывный смазочный слой, отделяющий эти поверхности друг от друга. Центр вала занимает положение O_2 , вследствие чего образуется клиновидный зазор. В сечении плоскости, проходящей через линию центров O_1O_2 , смазочный слой имеет минимальную толщину h_{\min} , величина которого должна удовлетворять неравенству:

$$h_{\min} \geq K(Rz_1 + Rz_2), \quad (4.28)$$

где $K = 1,2 \dots 1,3$ – коэффициент запаса.

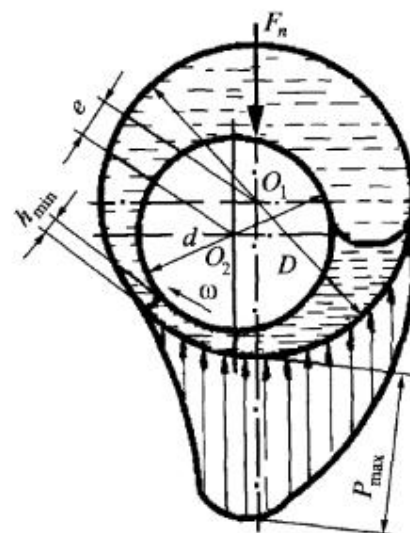


Рис. 4.18. Схема подшипника скольжения

Максимальное давление p_{\max} смещено от оси O_1O_2 в сторону, противоположную вращению вала. Работа, затрачиваемая на преодоление сопротивления вязкой жидкости, переходит в тепловую энергию, которая идет на нагрев масла и деталей подшипника.

Геометрия смазочного слоя и положение вала во втулке подшипника определяются двумя безразмерными параметрами: ψ – относительным зазором и χ – относительным эксцентриситетом:

$$\psi = \frac{D-d}{d} = \frac{R-r}{r} = \frac{\delta}{r}; \quad (4.29)$$

$$\chi = \frac{e}{\delta}, \quad (4.30)$$

где $\delta = R - r$; e – абсолютный эксцентриситет.

Коэффициент трения для подшипников скольжения f , полученный Н.П. Петровым, был найден на основе закона вязкого течения жидкости (4.1), если учесть, что

$$A = \pi dL, \\ (dv/dy) \approx v/\delta = r\omega/r\psi = \omega/\psi.$$

Тогда по выражению (4.20) сила трения

$$F_{тр} = \eta A \frac{dv}{dy} = \eta \pi dL \frac{\omega}{\psi}.$$

Отсюда коэффициент трения

$$f = \frac{F_{тр}}{F_n} = \frac{\eta \pi dL \omega}{p dL \psi} = \frac{\pi \eta \omega}{p \psi}. \quad (4.31)$$

Гидродинамическая теория смазки, базирующаяся на уравнениях Петрова-Рейнольдса, предполагает, что детали пары трения представляют собой абсолютно жесткие недеформирующиеся тела, а вязкость смазочного материала есть величина постоянная, не зависящая от давления и температуры.

Эта теория позволяет рассчитать несущую способность смазочного контакта и толщину смазочной пленки при относительно малых контактных давлениях в узлах трения (до 50 МПа).

При более высоких давлениях ($p > 300$ МПа) на состояние смазочного слоя начинают оказывать все большее влияние упругие свойства твердых тел и тепловые процессы, развивающиеся в смазочном материале. Эти явления учитываются контактно-гидродинамической теорией смазки, основы которой были разработаны А.И. Петрусевичем, А.М. Эртелем и А.Н. Грубиным [43].

Эта теория основывается на совместном решении гидродинамического уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 6\eta(v_1 + v_2) \frac{h - h_0}{h^3}; \quad (4.32)$$

уравнения упругих деформаций для контакта криволинейных тел (граничные условия: $x = -\infty, p = 0$):

$$h = h_0 + \frac{x^2 - x_0^2}{2R_{np}} - \frac{2}{\pi} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \int_{-\infty}^{x_0} p(\xi) \ln \left| \frac{\xi - x}{\xi - x_0} \right| d\xi; \quad (4.33)$$

уравнения, характеризующего тепловое состояние смазочного слоя:

$$\rho C_v \frac{\partial \theta}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \eta \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2; \quad (4.34)$$

зависимости вязкости от давления и температуры (граничные условия: $x = -\infty, \theta = \theta_0$):

$$\theta(x, 0) = \left(\frac{1}{\pi \rho_1 C_1 \lambda_1 v_1} \right)^{1/2} \int_{-\infty}^x \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} \frac{\partial \varepsilon}{(x - \varepsilon)^{1/2}} + \theta_0;$$

$$\theta(x, 0) = \left(\frac{1}{\pi \rho_2 C_2 \lambda_2 v_2} \right)^{1/2} \int_{-\infty}^x \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=h} \frac{\partial \varepsilon}{(x - \varepsilon)^{1/2}} + \theta_0;$$

$$\eta = \eta_0 e^{\beta p - \alpha \Delta \theta}, \quad (4.35)$$

где p – давление, $v_{1,2}$ – окружные скорости тел; h – зазор; h_0 – минимальный зазор (h_{\min}); R_{np} – приведенный радиус кривизны; $E_{1,2}$ – модули упругости тел; $\mu_{1,2}$ – коэффициенты Пуассона материалов тел; θ и $\Delta \theta$ – температура и ее приращение; $\rho_1, C_1, \lambda_1, \rho_2, C_2, \lambda_2$ – соответственно плотности, удельные теплоемкости и теплопроводности смазочного материала и материалов тел; β – пьезокоэффициент вязкости смазочного материала; α – коэффициент зависимости вязкости смазки от температуры; x и y – координаты; x_0 – абсцисса в месте выхода смазки из зазора; ξ и ε – дополнительные переменные; η_0 – вязкость масла при атмосферном давлении и температуре 20 °С.

Контактно-гидродинамическая теория смазки описывает состояние смазочного слоя в условиях высоких контактных напряжений, свойственным зубчатым передачам, подшипникам качения, кулачковым механизмам и др.

В легко нагруженном контакте вращающиеся поверхности цилиндров сохраняют свою геометрию без изменения, и распределение давления в масляном слое носит чисто гидродинамический характер (большинство подшипников скольжения, шарниры цепных передач и др.).

Известно, что жидкость несжимаема, а газ сжимаем. Это обуславливает и различия жидкостной смазки и газовой, т.к. уравнение Рейнольдса для газа будет иметь уже другой вид, чем для жидкости.

Преимущества газовой смазки: низкое сопротивление трению, доступность смазочного материала (воздух), отсутствие загрязнения поверхности подшипника, возможность применения в широком диапазоне температур (от низких отрицательных до высоких положительных).

Недостатки газодинамической смазки: низкая несущая способность, т.к. давление в газодинамических подшипниках примерно в 100 раз ниже, чем при гидродинамической смазке; низкая стабильность работы; высокие требования к точности изготовления и шероховатости поверхности подшипников.

В качестве примера применения газодинамической смазки можно привести подшипники шпинделя бормашины ($n = 420\,000$ об/мин, расход воздуха $20\,409$ м³/с при давлении $0,36$ МПа). Подшипники с газодинамической смазкой не пригодны для высоконагруженных агрегатов, у которых многократные пуски и остановки. В настоящее время их все чаще применяются в автоматах пищевого производства, в оборудовании текстильной и химической промышленности.

4.4. ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ

Из опыта человеческой деятельности известно, что работа, требуемая для качения тел друг относительно друга, обычно намного меньше, чем работа, необходимая для скольжения этих тел.

Трение качения – трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению (рис. 4.19).

При качении колеса по деформируемой под нагрузкой F_n поверхности к нему надо приложить момент вращения $F_k R$ для поддержания равномерного движения. Этот момент уравновешивается реактивным моментом $F_n^* K$, возникающим вследствие того, что реакция F_n^* , численно равная внешней нагрузке F_n , смещена на величину K относительно линии действия силы F_n .

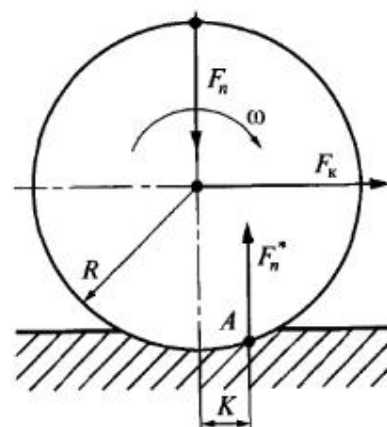


Рис. 4.19. Схема качения колеса по плоскости

Составив уравнение моментов относительно точки A , получим:

$$\sum M_A = F_k R - F_n^* K = 0, \quad (4.36)$$

$$K = \frac{F_k R}{F_n^*}. \quad (4.37)$$

Смещение K называется коэффициентом трения качения, имеющим линейную размерность. В такой форме он был получен в 1785 г. Ш. Кулоном.

Наряду с этой величиной употребляется безразмерная величина f_k – коэффициент сопротивления качению:

$$f_k = \frac{K}{R} = \frac{F_k}{F_n^*}. \quad (4.38)$$

При использовании этого коэффициента необходимо указывать, на каком радиусе получено значение F_k .

При качении упругого колеса по упругому полупространству сопротивление качению F_k обусловлено тремя причинами: гистерезисными потерями F_1 , микропроскальзыванием в зоне контакта F_2 и адгезией в контактной зоне F_3 :

$$F_k = F_1 + F_2 + F_3.$$

Упругий гистерезис F_1 возникает вследствие несовершенства упругих свойств реальных тел, участвующих в трении качения (рис. 4.20).

Под влиянием напряжения σ возникает деформация ϵ , однако, поскольку тело не идеально упругое, ϵ не прямо пропорционально σ (нарушается закон Гука, OA не прямая). Если снять напряжение ($\sigma = 0$), остается остаточная деформация OB , для снятия которой требуется отрицательное напряжение OE , т.е. сжимающая нагрузка.

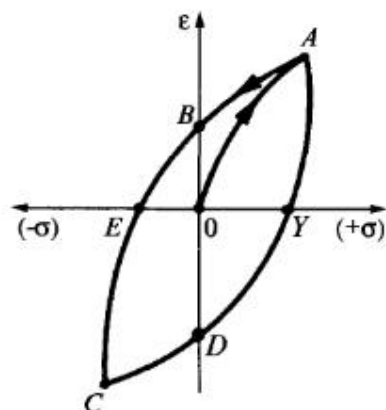


Рис. 4.20. Петля гистерезиса при знакопеременном нагружении материала

Прикладывая последовательно положительное и отрицательное напряжения, получим петлю *ABECDYA*, которую называют петлей гистерезиса. Площадь петли численно равна работе, необратимо рассеянной за один цикл в единице объема.

Гистерезис физически обусловлен переползанием дислокаций при нагружении. Увеличение числа дислокаций увеличивает гистерезисные потери.

При качении упругого катка по упругому полупространству вследствие их деформации создается площадка касания. В этом случае материал катка сжат, а материал опорной поверхности растянут (рис. 4.21). Поэтому в зоне контакта точки катка стремятся сблизиться при сжатии, а точки поверхности раздвинуться при растяжении. Это приводит к микропроскальзыванию F_2 в контактной зоне.

В зоне *AC* (см. рис. 4.21) при качении поверхности будут разделяться с разрывом адгезионных связей, действующих между катком и поверхностью. Этим фактором обусловлено проявление адгезионной составляющей F_3 в контактной зоне.

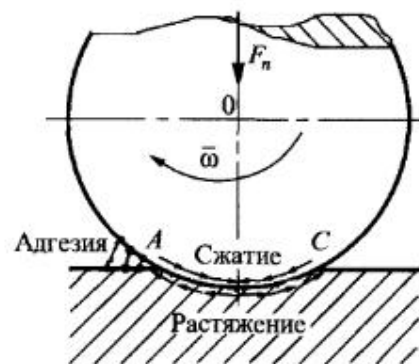


Рис. 4.21. Схема микропроскальзывания двух тел под нагрузкой

Естественно, что вклад в сопротивление качению микропроскальзывания и адгезии мал. Большую часть составляют гистерезисные потери.

В реальных условиях при качении колеса по дорожному полотну возможно появление всех трех факторов. Уровень их проявления будет зависеть от физической природы материалов и состояния окружающей среды. Для резины и полимеров преобладающим фактором будут гистерезисные потери от несовершенства их упругих свойств; для закаленных сталей – микропроскальзывание на площадке контакта; для металлов и полимеров в глубоком вакууме и при высоких температурах – адгезионное взаимодействие материалов.

Применение смазок в узлах качения преследует следующие цели: уменьшение трения проскальзывания; отвод излишнего тепла; защита поверхностей от коррозии. Чем выше вязкость смазки, тем выше сопротивление качению, которое продолжает расти с увеличением скорости (рис. 4.22). Коэффициент трения без смазки ниже, чем при смазке.

При переходе к более высоким скоростям качения (20...75 м/с) (см. рис. 4.22, б) наблюдается существенное изменение в характере и расположении кривых коэффициента трения качения. В этом случае большое влияние оказывает повышение температуры на снижение вязкости смазки.

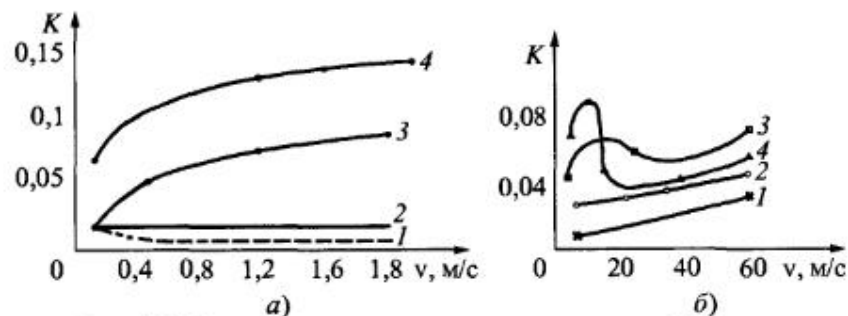


Рис. 4.22. Влияние смазочного материала на коэффициент качения при малых (а) и больших скоростях (б):

1 – качение без смазки; 2 – смазка бензолом (0,7 сСт); 3 – смазка техническим вазелином (25 сСт); 4 – смазка маслом МС-30 (1244 сСт)

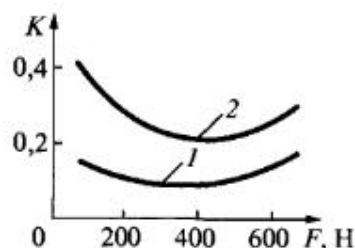


Рис. 4.23. Влияние нагрузки на коэффициент трения качения:
1 - $v = 0,07$ м/с; 2 - $v = 3,5$ м/с

Влияние нагрузки на коэффициент трения качения при малых скоростях показано на рис. 4.23.

Пластичные и твердые смазочные материалы, как правило, не вызывают резкого увеличения сопротивления качению по сравнению с жидкими материалами. Однако действие этих смазок недолговечно. Жидкостное трение лучше, но сопротивление качения зависит от вязкости смазки. Количество смазки также влияет на сопротивление качению. Обильная смазка увеличивает сопротивление качения.

4.5. РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ТРЕНИИ

На интенсивность взаимодействия деталей при трении оказывают влияние параметры внешнего воздействия, среди которых наиболее важную роль играют нагрузка F_n , скорость скольжения v , температура θ и окружающая газовая среда [12, 13].

Под действием нагрузки происходит формирование площади фактического контакта, взаимное внедрение микронеровностей тел и определяется уровень напряженно-деформированного состояния приповерхностного слоя (упругий, пластический контакт и т.д.).

Скорость скольжения или качения тел в свою очередь влияет на напряженно-деформированное состояние материалов через их реологические свойства. Для ряда материалов при увеличении скорости деформирования все более явно начинают проявляться их вязкостные свойства. При совместном воздействии нагрузки и скорости в тонком поверхностном слое за счет интенсивных упруго-

пластических деформаций формируется фрикционный тепловой источник с удельной мощностью

$$q \approx fpv.$$

В узлах трения разрушение смазочной пленки в контакте даже на доли секунд приводит к мгновенному повышению температуры на несколько сот градусов с последующим задиrom и выходом узла из строя. В трибологических процессах температурному фактору принадлежит исключительная роль [31].

С ростом температуры для многих материалов происходит снижение прочности поверхностных слоев:

$$H_{\text{пов}} = H_0 \exp \left[-\beta \frac{\theta}{\theta_{\text{пл}}} \right], \quad (4.39)$$

где $H_{\text{пов}}$ – микротвердость поверхностного слоя материала при температуре θ ; H_0 – микротвердость поверхностного слоя материала при температуре 20 °С; $\theta_{\text{пл}}$ – температура плавления тела; β – коэффициент, отличающий данный материал от других.

На нагруженном фрикционном контакте увеличение температуры вызывает дополнительные термические напряжения, которые суммируются с основными герцовскими напряжениями. Их величина будет зависеть от удельной тепловой мощности фрикционного источника и интенсивности отвода тепла с поверхности за счет теплопроводности.

Для расчета термоупругих напряжений на поверхности контакта криволинейных тел при трении $\sigma_{\text{тв}}$ М.В. Коровчинским предложена формула (материал двух тел одинаков):

$$\sigma_{\text{тв}} = \sigma_n + \frac{0,3}{\pi} f F_n v \frac{E}{1-\mu} \frac{\alpha}{\lambda}, \quad (4.40)$$

где σ_n – максимальное герцево напряжение для неподвижного контакта; f – коэффициент трения; F_n – нагрузка; v – скорость скольжения; E , μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов; α – коэффициент температуропроводности материалов; λ – коэффициент теплопроводности материалов.

Приведенные численные оценки показали, что величина термоупругих напряжений соизмерима с величиной σ_n .

Скорость химических реакций ω связана с температурой законом Аррениуса:

$$\omega = \exp\left[-\frac{u}{R\theta}\right], \quad (4.41)$$

где u – энергия активации химической реакции; R – универсальная газовая постоянная; θ – абсолютная температура.

При граничном трении при температуре тела, превышающей критическую температуру смазочного материала $\theta > \theta_{кр}$, происходит разрушение граничных пленок смазки и резкое возрастание коэффициента трения и износа материалов.

Распределение температуры в каждом из тел описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (4.42)$$

где θ – температура; t – время; x, y, z – координаты; α – коэффициент теплопроводности.

Начало изучения тепловых процессов при трении было положено работами Ф. Боудена [6], который установил, что суммарная температура на фактическом пятне контакта θ_{Σ} равна сумме средней поверхностной температуре $\theta_{п}$ и температуре вспышки $\theta_{всп}$ [6]:

$$\theta_{\Sigma} = \theta_{п} + \theta_{всп}. \quad (4.43)$$

Температура $\theta_{всп}$ для круглой площадки контакта радиусом r_{ϕ} может быть рассчитана по формуле [22]:

$$\theta_{всп} = \frac{9}{32} \frac{fF_n v}{(\lambda_1 + \lambda_2) r_{\phi}}. \quad (4.44)$$

Для наиболее общего случая контакта катящихся тел, например, зубчатых передач:

$$\theta_{всп} = \frac{0,83 f F_n (v_1 - v_2)}{(\sqrt{\lambda_1 C_1 \rho_1 v_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2 \rho_2 v_2}) l \sqrt{a}}, \quad (4.45)$$

где F_n – нормальная нагрузка в контакте; $v_{1,2}$ – окружные скорости тел; $\lambda_{1,2}$, $C_{1,2}$, $\rho_{1,2}$ – теплопроводность, теплоемкость и плотность

тел 1 и 2; a – полуширина площади контакта; l – длина площадки контакта.

Кроме того, необходимо учитывать, что вязкость масел, определяющая толщину гидродинамической пленки, в сильной мере зависит от температуры. Расчеты показывают, что если принять, что минимальная толщина гидродинамической пленки смазки линейно зависит от вязкости масла, то повышение температуры с 50 до 100 °С приведет к уменьшению толщина пленки в 8 раз.

Глава 5

ИЗНАШИВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В процессе эксплуатации в основных деталях машин накапливаются повреждения, которые чаще всего приводят к усталостным разрушениям.

Усталостные разрушения вызываются циклически повторяющимися режимами нагружения (см. п. 2.2). Большие давления на контакте приводят к появлению опасных зон в металле деталей, изменению плотности дислокаций в них, образованию микротрещин, слиянию их в микротрещины и, наконец, к разрушению (например, выкрашиванию на беговых дорожках подшипников качения, зубьев зубчатых передач), а также усталостному износу валов, болтов и многих других деталей. В качестве примера рассмотрим результаты анализа причин усталостного разрушения деталей автомобиля при различных эксплуатационных условиях, полученные немецким ученым Г. Польцером (табл. 5.1).

Анализ данной таблицы показывает, что дефекты самого материала в процессе металлургического производства составляют незначительную часть. Чаще всего усталостные разрушения обусловлены конструктивными, технологическими и эксплуатационными причинами. Большая доля от этих причин относится к износовым отказам (90 %). Поэтому изучение этого явления является очень важным в повышении сроков службы деталей.

В соответствии с ГОСТ 27674-88 *изнашиванием* деталей машин называют процесс постепенного изменения их размеров и формы при трении, проявляющихся в разрушении и отделении с поверхности трения материала и (или) накопления его остаточной деформации.

Интенсивность изнашивания – отношение величины износа к обусловленному пути, на котором происходит изнашивание, или

5.1. Анализ причин разрушения деталей автомобиля

Причины выхода деталей из строя	Доля, %	Составляющие причины	Доля, %
Материал	12	1. Изготовление (металлургия)	4
		2. Формообразование и термообработка (прокатка)	8
Технология изготовления	22,5	–	22,5
Конструкция и условия эксплуатации	65,5	1. Выбор материалов (конструкторы)	1
		2. Конструктивные решения (наличие концентраторов напряжения и др.)	38,5
		3. Поверхностные разрушения, возникающие при эксплуатации	19
		4. Перегрузки (эксплуатация)	7

объему выполненной работы, или к величине работы (энергии), затраченной за период изнашивания. Например, мм/км пробега, г/м³.

В процессе работы машины показатели изнашивания деталей и сопряжений не сохраняют постоянных значений. Они изменяются во времени чаще всего по кривой В.Ф. Лоренца (рис. 5.1).

Кривая В. Ф. Лоренца характеризуется тремя периодами (участками): I – период приработки; II – период установившегося изнашивания; III – период катастрофического изнашивания.

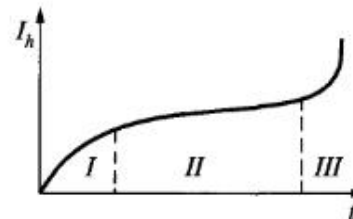


Рис. 5.1. Влияние времени эксплуатации на интенсивность изнашивания I_h деталей машин (кривая В.Ф. Лоренца)

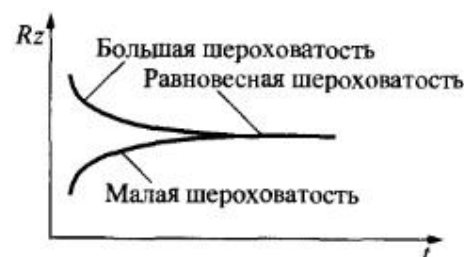


Рис. 5.2. Влияние времени эксплуатации на установление равновесной шероховатости: Rz – средняя высота неровностей; t – время

Процесс приработки (I) характеризуется повышенным тепловыделением, изменением микрогеометрии поверхностей и интенсивным отделением с поверхности трения продуктов износа. Экспериментально установлено, что в различных условиях и различных парах трения после приработки устанавливается одинаковая, равновесная шероховатость, характерная для определенных материалов (рис. 5.2).

Процесс установившегося изнашивания (II) характеризуется небольшой интенсивностью изнашивания и продолжается до тех пор, пока изменения размеров и формы деталей не повлияют на условия их работы или до наступления предела усталости материала.

Процесс катастрофического или аварийного изнашивания (III) – это период, когда на износые отказы накладываются коррозионные, усталостные процессы и процессы старения материала. Это практически предаварийное (аварийное) состояние трибосопрежений или машины.

5.1. КЛАССИФИКАЦИИ ВИДОВ ИЗНАШИВАНИЯ

На величину износа влияет большое количество факторов, которые могут вызвать различные виды разрушения поверхностей трибосопрежений. В зависимости от преобладания какого-либо фактора или группы факторов различают следующие группы изнашивания (ГОСТ 27674–88): механическое, коррозионно-механическое и электроэрозионное, классификация которых показана на рис. 5.3.

В качестве примера в табл. 5.2 приведены виды и подвиды изнашивания элементов и отдельных деталей автомобиля.



Рис. 5.3. Классификация видов и подвидов изнашивания

5.2. Виды и подвиды изнашивания элементов и деталей автомобиля

Вид и подвид изнашивания	Элементы и детали автомобиля
Абразивное:	
– о закрепленный абразив (монолит)	Протекторы шин
– в абразивной прослойке	Валы и уплотнения (манжеты), шаровые опоры, детали цилиндра-поршневой группы, шарниры
– гидроабразивное	Элементы, системы охлаждения и топливной системы
– газоабразивное	Низ кузова, элементы глушителя

Продолжение табл. 5.2

Вид и подвид изнашивания	Элементы и детали автомобиля
Усталостное	Большинство трибосопряжений (подшипники, зубчатые колеса, кулачки, толкатели, клапана и др.)
Кавитационное	Зарубашечное пространство цилиндров, детали и элементы системы охлаждения
Адгезионное	При высокой температуре и плохой смазке все подшипники скольжения, цапфы валов, кольца и цилиндры
Эрозионное	Элементы системы подачи воздуха, выхлопа и, при больших скоростях, верх кузова
Коррозионно-механическое:	
– окислительное	Детали кузова, особенно закрытые и труднодоступные места
– фреттинг-коррозия	Рессоры, посадочные места соединений с гарантированным натягом и др.
Электроэрозионное	Электроконтакты прерывателя-распределителя, щетки генератора, стартера и др.

5.2. АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Абразивным называется механическое изнашивание материала детали в результате режущего или царапающего действия на него абразивных частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. Абразивные частицы, обладая большей, чем металл твердостью, разрушают поверхность деталей и резко увеличивают их износ. Частицы чаще всего бывают минерального происхождения, оксидами, продуктами износа или наклепанными металлическими частицами. Они имеют различную форму, часто острые грани или ребра. Основной механизм их воздействия – резание или царапание.

Абразивное изнашивание является одним из наиболее распространенных видов изнашивания. В транспортных и дорожных ма-

шинах более 60 % случаев износа имеют абразивный характер. Основным источником попадания абразивных частиц в сопряжения машин является окружающая среда. В 1 м^3 воздуха содержится от 0,04 до 5 г пыли, на 60...80 % состоящей из взвешенных частиц минералов (кварц, корунд, оксиды и диоксиды кремния, соединения Al, Ca, Mg, Na и другие элементы). Частицы минералов, содержащихся в воздухе, обладают высокой твердостью (диоксид кремния SiO_2 10 780...11 700 МПа, оксид алюминия 20 900...22 900 МПа), что превышает твердость рабочих поверхностей большинства деталей машин.

Интенсивность абразивного изнашивания прямо пропорциональна твердости H_a абразивных частиц и обратно пропорциональна твердости H_m поверхности трения [9, 44]. Материалы высокой твердости обладают повышенной абразивной износостойкостью.

Критическое значение отношения $h_{кр}$ (глубины внедрения абразивной частицы в изнашиваемый материал) к радиусу закругления частицы r приводит к микрорезанию:

$$\frac{h_{кр}}{r} \geq \frac{1 - (2\tau/\sigma_T)}{2}$$

Количественная зависимость абразивного изнашивания от твердости абразива и твердости изнашиваемого материала представлена на рис. 5.4 и 5.5.

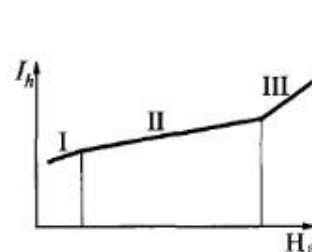


Рис. 5.4. Влияние твердости абразива на интенсивность изнашивания материала детали:

I – $H_a < H_m$;
II – $H_a \approx H_m$; III – $H_a > H_m$

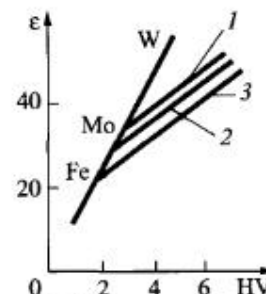


Рис. 5.5. Зависимость относительной износостойкости металлов от их твердости:

1 – сталь 12X; 2 – сталь У12;
3 – сталь 40

5.2.1. Изнашивание о закрепленный абразив

Трение о закрепленный абразив (монолит) сопровождается изнашиванием металла и разрушением самого абразива путем дробления и скола частиц (рис. 5.6). Это обуславливает обновление изнашивающей способности абразива по отношению к металлу.

На практике могут встречаться различные варианты такого подвида абразивного изнашивания (монолит абразива, абразивная шкурка и др.), отличающиеся изнашивающей способностью, но общим для них будет то, что абразивные частицы зафиксированы.

При таком взаимодействии металл-абразив проявляется прочностная основа. Если металл будет более твердым и прочным – разрушаться будет абразив, а наоборот – будет происходить резание и деформирование металла.

Основной признак такого подвида абразивного изнашивания – наличие на металлической поверхности хорошо различимых рисок (царапин) и углублений различной протяженности, но всегда ориентированных в направлении движения металла или абразива (рис. 5.7).

Интенсивность изнашивания металла можно выразить в функциональном виде как

$$I_h = \varphi(H_a, H_m, \sigma_m, \sigma_a, F_n, T),$$

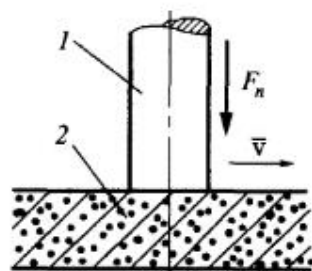


Рис. 5.6. Схема изнашивания индентора 1 об абразивный монолит 2

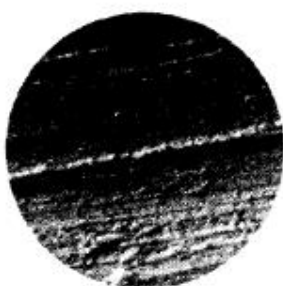


Рис. 5.7. Топография поверхности трения при изнашивании материала о закрепленный абразив (материал – сталь Ст3, $\times 10$)

где H_a – твердость абразива; H_m – твердость материала образца; σ_m – прочность материала образца; σ_a – прочность абразива; F_n – нормальная нагрузка; T – температура на поверхности детали.

При высоких нагрузках трение металла по монолиту абразива может качественно изменить механизм изнашивания и рельеф в зоне контакта. Абразивное изнашивание может перерасти частично в тепловое. При этих условиях охлаждающая жидкость может положительно влиять на характер контакта в зоне трения и на износ поверхностей трения.

5.2.2. Изнашивание в абразивной прослойке

Изнашивание незакрепленными абразивными частицами обычно наступает при динамическом контактировании металлических поверхностей 1 и 2, когда между ними попадают абразивные или иные твердые частицы 3 (рис. 5.8).

При такой схеме твердые частицы присутствуют в виде абразивной прослойки, препятствующей полному сближению контактирующих поверхностей.

В абразивной прослойке твердые частицы могут ударяться своими гранями о металлическую поверхность, скользить, шаржировать или вращаться, вызывая на ней углубления, язвы или царапины (рис. 5.9).

Изнашивание в абразивной прослойке происходит в узлах и сочленениях, чаще всего в виде вал-втулка, в различных машинах и механизмах. Наличие в абразивной прослойке жидкой среды (масла, воды и др.) улучшает условия взаимодействия элементов

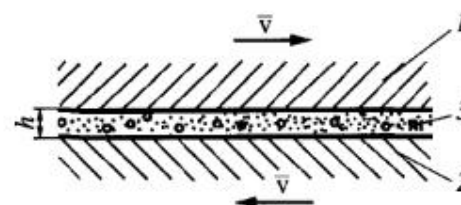


Рис. 5.8. Изнашивание металлических поверхностей в абразивной прослойке

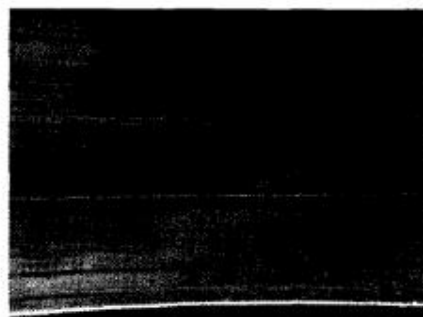


Рис. 5.9. Топография изношенной поверхности вкладыша подшипника скольжения (материал – сплав АО20-1, $\times 4$)

трибосопряжения за счет охлаждающего и смазывающего действия жидкости. Эта среда также способствует выносу абразива из зазора. В этих случаях на изнашиваемой поверхности для улучшения охлаждения предусматривают карманы, куда попадают абразивные частицы, и в дальнейшем они не участвуют в процессе изнашивания, а затем удаляются жидкостью из зоны контакта.

Интенсивность изнашивания в абразивной прослойке можно выразить зависимостью

$$I_h = \varphi(H_a, H_m, \sigma_m, \sigma_{as}, F_n, O, T),$$

где O – окатанность абразивной частицы (остальные обозначения см. выше).

5.2.3. Изнашивание в абразивной массе

При движении деталей машин в массе незакрепленных абразивных частиц силовое воздействие на контакте отдельно взятой частицы и детали будет аналогично воздействию, наблюдаемому в рассмотренных ранее подвидах абразивного изнашивания (рис. 5.10). Абразивная частица будет совершать по поверхности детали перемещение, сопровождаемые микрорезанием или пластическим деформированием детали [9].

Условия изнашивания при трении в абразивной массе по внешнему силовому воздействию на контакте существенно отличаются от условий при других подвидах абразивного изнашивания: абразивная масса податлива; сопротивление перемещению

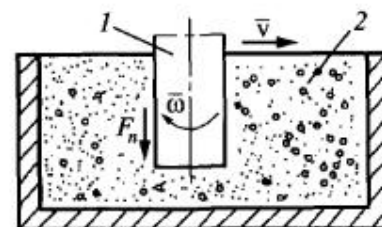


Рис. 5.10. Схема изнашивания образца 1 в абразивной массе 2

деталей в ней гораздо ниже, чем при других подвидах абразивного изнашивания; абразивные частицы будут оттесняться деталью с пути перемещения; усилие на контакте будет определяться скоростью движения детали в абразивной массе, плотностью этой массы, размером и твердостью ее частиц, а также наличием жидкой среды в массе абразива.

Интенсивность изнашивания поверхности при трении в абразивной массе значительно ниже, чем, например, при трении по закрепленному абразиву. Этому подвиду абразивного изнашивания подвергаются на практике детали сельскохозяйственных почвообрабатывающих машин, растворо- и бетономешалок в строительстве, рабочие органы горных машин и т.д. На рис. 5.11 в качестве примера показан характер износа в гидроабразивной массе резиновой футеровки спиральных классификаторов. Поверхность является относительно гладкой с небольшими продольными царапинами и мелкими углублениями, что свидетельствует о реализации усталостного и малоинтенсивного абразивного изнашивания.



Рис. 5.11. Характер износа в абразивной массе рабочей поверхности футеровки спиральных классификаторов (материал – резина 10214, $\times 5$)

Интенсивность изнашивания в абразивной массе можно функционально выразить как

$$I_h = \varphi(\omega, v, \rho_a, d, F_n, O, A).$$

где ω – угловая скорость образца; v – линейная скорость перемещения образца или абразивной частицы; ρ_a – плотность абразивной частицы; d – диаметральный размер абразивной частицы; F_n – нормальная нагрузка; O – окатанность абразивной частицы; A – агрессивность среды.

5.2.4. Изнашивание при ударе по абразиву

Известны многочисленные примеры изнашивания деталей машин, механизмов и инструментов, вызванного ударом по закрепленному (монокристаллическому) или незакрепленному абразиву в виде свободно расположенных на твердой поверхности частиц или глыб породы (рис. 5.12) [9].

Прямое внедрение твердой частицы в образец под действием удара создает на нем углубление в виде лунки, приближенно копирующее геометрию частицы (рис. 5.13).

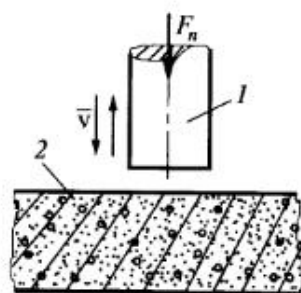


Рис. 5.12. Схема воздействия образца 1 при ударе по абразиву (монокристаллическому) 2



Рис. 5.13. Топография изношенной металлической поверхности при ударе по закрепленному абразиву (материал – сталь Ст3, $\times 10$)

На конечный результат внедрения частицы абразива в лунку влияют многие факторы:

$$I_h = \varphi(H_a, H_m, F_n, m, v, \sigma_a, \sigma_m),$$

где v – линейная скорость перемещения образца; H_a – твердость абразива; H_m – твердость материала образца; F_n – нормальная нагрузка; σ_a – прочность абразива; σ_m – прочность материала образца; m – масса частицы.

5.2.5. Газоабразивное изнашивание

Газоабразивному изнашиванию присуще изнашивание свободными абразивными частицами, увлекаемыми воздушным (газовым) потоком, гравитационными силами или центробежной силой в центробежных ускорителях абразивных частиц (рис. 5.14). Оно наблюдается на деталях пескоструйных аппаратов, струйных мельниц, компрессорах, промышленных вентиляторах, нагнетателях, деталях, эксплуатирующихся в запыленном потоке и т.д.

Изучению изнашивания материалов в газоабразивном потоке посвящены работы И.К. Лебедева, В.И. Кашеева, В.Н. Виноградова, Г.М. Сорокина, И.Р. Клейса, Е.Ф. Непомнящего, Г. Уэту, К. Веллингера, Н. Финни и др.

Наиболее сильное влияние на формирование процесса газоабразивного изнашивания и его интенсивность оказывают энергетические факторы (скорость и масса частицы), а также угол атаки α [9, 19, 40]. При малых углах атаки наблюдается удар частиц со скольжением и в этом случае интенсивность изнашивания многих материалов близка к абразивному изнашиванию при скольжении по монолиту (рис. 5.15, а). При углах атаки, близких к 90° , механизм

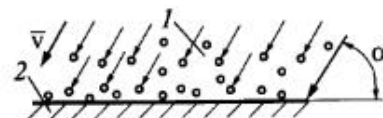


Рис. 5.14. Схема воздействия газоабразивного потока 1 на изнашиваемую поверхность 2

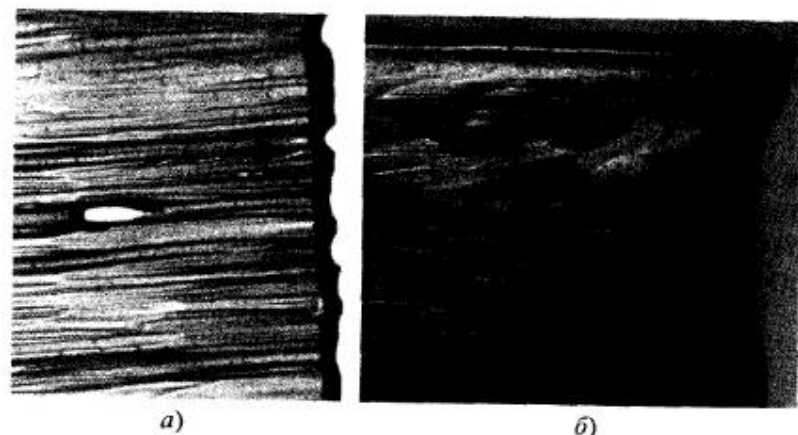


Рис. 5.15. Характер износа лопатки пескоструйного аппарата при углах атаки:

a – близких к 0; *б* – близких к 90° (материал – сплав ИЧХ28Н2)

абразивного изнашивания изменяется (рис. 5.15, б). Высокую газоабразивную износостойкость в этом случае показывают металло-керамические твердые сплавы и эластомеры. Пластмассы имеют износостойкость на 1...3 порядка ниже [19].

На многих деталях, подверженных газоабразивному изнашиванию, образуется волнистая поверхность по направлению, перпендикулярному к вектору скорости потока твердых частиц. Образование волн на изнашивающейся поверхности под воздействием потока твердых частиц связывают с поведением этого потока в пристенной части [19, 40]. Однако такие волны образуются при малых углах атаки, чаще всего при наличии завихрения потока.

Интенсивность газоабразивного изнашивания материалов и деталей машин может быть выражена зависимостью

$$I_h = \varphi(v, \rho, d, \alpha, H_a, H_m, m, O, T, t),$$

где v – скорость газоабразивного потока; ρ – плотность абразивной частицы; d – диаметральный размер абразивной частицы; α – угол атаки; H_a – твердость абразива; H_m – твердость материала образца; m – масса частицы; O – окатанность абразивной частицы; T – температура на поверхности детали; t – время испытаний.

5.2.6. Гидроабразивное изнашивание

При гидроабразивном изнашивании носителем абразивных частиц является жидкость. Поэтому интенсивность гидроабразивного изнашивания зависит от факторов, управляющих формированием процесса изнашивания (скорость, масса частиц, угол атаки и др.) с учетом разупрочняющего действия жидкой среды на поверхностный слой детали. Этому виду изнашивания подвергаются детали песковых, рефулерных насосов, гидротурбин и многочисленного горнообогатительного оборудования (гидроциклонов, флотационных машин, сепараторов, пульпопроводов и др.).

Закономерности этого сложного процесса исследовали ряд отечественных и зарубежных ученых (С.Л. Козырев, М.М. Тененбаум, Е. Кригель, Г. Финне и др.). Силовая схема взаимодействия частиц и среды с поверхностью детали такая же, как и при газоабразивном изнашивании, т.е. решающую роль в этом процессе играет угол атаки. Так же, как и при газоабразивном изнашивании на поверхности изнашиваемой детали образуются своеобразные волны износа, а в некоторых случаях даже более явно выраженные. Направление волн соответствует направлению движения потока, в том числе и его завихрений (рис. 5.16).

Присутствие жидкости в зоне соударения абразивных частиц с поверхностью детали активизирует этот процесс за счет вымывания, очищения контакта от мелких абразивных частиц, а также



Рис. 5.16. Характер износа рабочего колеса пескового насоса в гидроабразивном потоке (материал – хромоникелевый чугун ИЧХ28Н2)

за счет расклинивающего действия жидкости на микротрещины поверхности. Абразивные частицы, движущиеся в жидкости с определенной скоростью, представляют собой более устойчивую и стабильную систему, в которой взаимное соударение частиц при их движении, отскок, рикошет от поверхности изнашивания затруднены сопротивлением жидкой фазы определенной вязкости. В то же время жидкость лучше охлаждает изнашиваемую поверхность, является своего рода смазкой при ударе частицы со скольжением, что в свою очередь снижает коэффициент трения и соответственно, интенсивность изнашивания, особенно резиновых и гуммированных деталей [32].

Однако при определенных значениях скорости гидроабразивного потока и давления, абразивное изнашивание в жидкости усиливается и усложняется кавитацией [21, 41].

Интенсивность гидроабразивного изнашивания материалов и деталей машин может быть выражена зависимостью:

$$I_h = \varphi(v, \rho, d, \alpha, H_a, H_m, m, \sigma_a, \sigma_m, O, T, t, A),$$

где v – линейная скорость потока абразива; ρ – плотность абразивной частицы; d – диаметральный размер абразивной частицы; α – угол атаки; H_a – твердость абразива; H_m – твердость материала образца; m – масса частицы; σ_a – прочность абразива; σ_m – прочность материала образца; O – окатанность абразивной частицы; T – температура на поверхности детали; t – время испытаний; A – агрессивность среды.

5.3. УСТАЛОСТНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Усталостное изнашивание – механическое изнашивание материалов в результате многократного деформирования микрообъемов материала. Оно может иметь место как при трении несмазанных контактируемых поверхностей, так и при режимах граничной и жидкостной смазок. Это один из наиболее распространенных видов поверхностного разрушения деталей, находящихся в условиях циклического контактного нагружения (зубчатые передачи, подшипники скольжения, качения, кулачковые механизмы и многие другие детали).

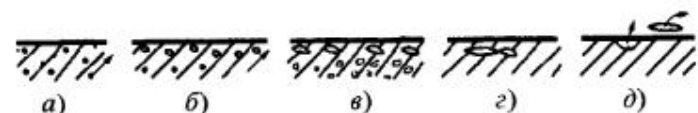


Рис. 5.17. Схема перемещения дефектов в зоне контакта изнашиваемого материала и образования частичек износа

Механизм усталостного изнашивания последовательно раскрывается на рис. 5.17.

Относительное перемещение тел при скольжении вызывает миграцию зон фактического контакта на поверхности каждого из них, в результате чего напряженное и деформированное состояние микрообъемов многократно меняется (рис. 5.17, а). Это вызывает накопление в локальных объемах на глубине поверхностного слоя различного рода дефектов: дислокаций, вакансий, несовершенств структуры, инородных включений и других концентраторов напряжений (рис. 5.17, б, в). В дальнейшем происходит перемещение их к поверхности и развитие этих дефектов в микротрещины (рис. 5.17, г), которые смыкаются между собой и образуют частички износа (рис. 5.17, д). В результате на рабочей поверхности детали появляются многочисленные раковины и углубления (рис. 5.18).

В 60-х годах XX века И. В. Крагельским была разработана усталостная теория изнашивания материалов. В ее основу положена расчетная модель, показанная на рис. 5.19.



Рис. 5.18. Усталостное изнашивание наружного кольца подшипника качения (материал – сталь ШХ15, $\times 4$)

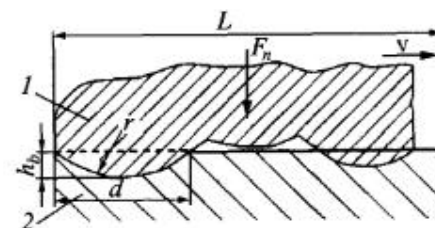


Рис. 5.19. Модель контакта жесткого шероховатого тела с деформируемым гладким телом

Рассматривается взаимодействие при относительном смещении абсолютно жесткого недеформируемого шероховатого тела 1 с деформируемым гладким телом 2. При этом принимаются следующие допущения:

а) микрогеометрия тела 1 представляет собой набор сферических сегментов радиусом r , которые расположены по высоте в соответствии с кривой опорной поверхности

$$\eta = b\varepsilon^{\nu},$$

где $\eta = A_r / A_a$ – относительная площадь касания тел (где A_r и A_a – фактическая и номинальная площади касания); $\varepsilon = h/r$ – относительное сближение тел (где h – сближение тел, r – радиус сферы); b и ν – постоянные коэффициенты;

б) при движении тела 1 относительно тела 2 отдельные поверхностные микрообъемы последнего испытывают знакопеременные циклические деформации;

в) принимается линейная гипотеза суммирования отдельных циклов воздействия неровностей тела 1 на микрообъемы материала тела 2, т.е. $n_{\Sigma} = \sum n_i$;

г) число циклов до отделивания материала зависит от напряженного состояния на контакте.

При этом различают, как отмечалось в п. 2.2, многоцикловую фрикционную усталость, когда напряжения на контакте ниже предела текучести материала тела 2 (упругий контакт), и малоцикловую фрикционную усталость, при которой напряжения на контакте достигают предела текучести (пластический контакт). Каждому из этих случаев соответствует свое экспериментально получаемое уравнение, определяющее необходимое число циклов до разрушения материала:

для упругого контакта

$$n_y = (\sigma_0 / \sigma)^{\gamma}, \quad (5.1)$$

для пластического контакта

$$n_{пл} = (\varepsilon_0 / \varepsilon)^{\gamma}, \quad (5.2)$$

где σ_0 и ε_0 – напряжение и относительная деформация материала, при котором образование частицы износа происходит при одно-

кратном воздействии ($n = 1$); σ и ε – действующее на контакте напряжение и деформация; t – параметр фрикционной усталости материала, определяемый экспериментально ($0 < t < 8$ для упругого контакта и $2 < t < 3$ для пластического контакта).

Наиболее перспективным является энергетический подход к определению долговечности материалов и деталей машин, где число циклов можно определить как отношение энергии затраченной на повреждение материала при действии переменных напряжений к общей энергии, необходимой для разрушения материала при однократном нагружении.

Уравнение интенсивности изнашивания при усталостной модели разрушения материала получается следующим образом. Изнашивание материала тела 2 (см. рис. 5.19) характеризуется линейной интенсивностью изнашивания:

$$I = \frac{h}{L} = \frac{V_{\Sigma}}{A_a L}, \quad (5.3)$$

где V_{Σ} – суммарный объем материала удаляемого на пути трения L ; A_a – номинальная площадь контакта; h – толщина изношенного слоя материала.

Так как фактически материал удаляется лишь с реальных пятен касания (с фактической площади контакта A_r), вводится понятие удельной интенсивности изнашивания:

$$i_h = \frac{V_d}{A_r d}, \quad (5.4)$$

где V_d – объем материала тела 2, удаленного с площади A_r , при перемещении тела 1 на величину диаметра пятна контакта d в результате одного акта воздействия тел.

Принимается, что изнашивание происходит по установившемуся (линейному) закону, поэтому справедливо соотношение

$$\frac{V_{\Sigma}}{V_d} = \frac{L}{d}. \quad (5.5)$$

Тогда, разделив выражение (5.3) на (5.4), получим

$$I = i_h \frac{A_r}{A_a} = i_h \frac{p_a}{p_r}, \quad (5.6)$$

где p_a и p_r – давление на номинальной и фактической площадях касания.

Предположим, что в деформировании участвует только объем тела 2, численно равный объему внедрившихся неровностей тела 1 (см. рис. 5.10):

$$V_b = \int_0^{h_b} A_r dh = A_a R_{\max} b \int_0^{\epsilon} \epsilon^{\nu} d\epsilon = A_a R_{\max} \frac{b\epsilon^{(\nu+1)}}{(\nu+1)}. \quad (5.7)$$

Предположим также, что объем V_b разрушится за n циклов взаимодействия тел

$$V_b = nV_d. \quad (5.8)$$

Тогда, подставив (5.7) и (5.8) в (5.4), получим

$$i_h = \frac{A_a R_{\max} b \epsilon^{(\nu+1)}}{(\nu+1) A_r n d} = \frac{h_b}{(\nu+1) n d}. \quad (5.9)$$

Для сферической неровности (см. рис. 5.10) справедливо из геометрических соотношений приближенное равенство [31]:

$$d = 2\sqrt{2rh_b}. \quad (5.10)$$

Подставляя в формулу (5.6) значения (5.9) и (5.10), получим уравнение интенсивности изнашивания материала при фрикционно-усталостном изнашивании:

$$I_h = \frac{0,3}{(\nu+1)} \sqrt{\frac{h_b}{r} \frac{p_a}{p_r} \frac{1}{n}}. \quad (5.11)$$

Таким образом, интенсивность изнашивания материала определяется относительной глубиной внедрения неровности h_b/r и, соответственно, пропорциональной ей внешней нагрузкой F_n , микрогеометрией поверхности ν , соотношением номинального и фактического давлений p_a/p_r и числом циклов n , приводящих к отделению частицы износа. Число циклов n зависит от контактных на-

пряжений и деформаций. Они связаны процессами трения на контакте и определяется уравнениями (5.1) и (5.2).

Принимая гипотезу линейного суммирования фрикционно-усталостных повреждений на основе уравнения (5.11), получены аналитические зависимости для расчета интенсивности изнашивания трибосопряжений для упругого и пластического контакта твердых тел [25].

5.4. КАВИТАЦИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Одним из видов механического изнашивания является кавитационное [21].

Кавитацией называется процесс образования и исчезновения пузырьков в жидкости вследствие местного изменения давления. Если давление в потоке жидкости падает ниже давления насыщенных паров, например из-за резкого изменения геометрии течения, то в ней образуются ядра кавитации, которые перемещаются вместе с жидкостью. Когда пузырьки достигают области повышенного давления, они резко схлопываются, что может вызвать эрозию, если схлопывание происходит вблизи поверхности твердого тела. Кавитация такого типа обычно наблюдается в гидравлических турбинах, трубопроводах, на лопастях гребных винтов, подводных крыльев судов и т.п. и называется гидродинамической. Кавитация может возникнуть в жидкостях, которые подвергаются воздействию периодически изменяющегося давления, например в гидравлических насосах, клапанах, а также в системах смазки и охлаждения двигателей, подвергающихся вибрации, например, дизелей (рис. 5.20). В этом случае кавитация называется вибрационной.

Кавитационное изнашивание обычно очень интенсивное и наблюдается на поверхности деталей при схлопывании пузырьков, величина ударной волны или ударной струи при этом может достигать $10^3 \dots 10^4$ МПа.

В основе кавитационного изнашивания лежат следующие физические явления.

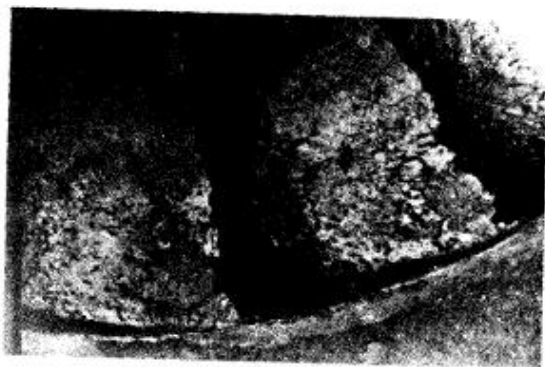


Рис. 5.22. Губчатая структура поверхности лопастей гидротурбины в результате кавитационного изнашивания (материал – сталь 35Л)

Многokrатно повторяющиеся ударные импульсы вызывают усталостное разрушение материала детали. Износ поверхности детали имеет обычно форму отдельных углублений, которые затем объединяются в более крупные каверны, имеющие губчатую форму (рис. 5.22).

Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от свойств жидкости, материалов деталей, режимов работы машины.

5.5. АДГЕЗИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Адгезионное изнашивание возникает вследствие действия сил молекулярного сцепления на поверхности раздела двух металлических деталей с образованием адгезионных связей (мостиков сварки). Этот вид взаимодействия называют изнашиванием при заедании, схватывании и т.д. [6, 20, 31].

Сила адгезионного взаимодействия зависит от степени чистоты поверхностей, площади фактического контакта, природы материалов, нагрузки и температуры на контакте. Для адгезионного схватывания или заедания сопрягаемых материалов на площади фактического контакта энергетическое состояние может достигаться как за счет повышения температуры, так и за счет совместного пластического деформирования. В связи с этим различают

два вида заедания: холодное при высоких контактных давлениях на фактических пятнах касания, достигающих предела текучести материала и относительно малых скоростях скольжения; горячее – при высоких скоростях скольжения и температурах свыше 100...150 °С [31].

При холодном заедании, как правило, повышается коэффициент трения до величины $f = 0,3 \dots 1,0$, в результате чего может прекратиться относительное движение деталей машин. Холодное заедание характерно для тяжело нагруженных малоподвижных трибосопряжений, работающих в режиме граничного трения, горячее – для высокоскоростных узлов трения, когда вследствие разрушения гидродинамической смазочной пленки происходит касание микровыступов тел и мгновенное повышение температуры поверхности (рис. 5.23).

При горячем заедании процессы разрушения металлов локализируются в тонком размягченном поверхностном слое и протекают менее катастрофично, чем при холодном заедании. Поверхности трения после горячего заедания хотя и имеют продольные риски и борозды, но глубина их значительно меньше и кромки рисков обычно скруглены за счет оплавления металла. Температура при горячем заедании играет двойную роль: она интенсифицирует процесс схватывания за счет разрушения смазочной пленки и



Рис. 5.23. Адгезионное изнашивание внутренней дорожки подшипника качения (материал – сталь ШХ15, $\times 4$)

снижения прочности металлов, но при этом локализирует процессы разрушения в тонком поверхностном слое. В результате этого, при горячем заедании интенсивность изнашивания материалов и коэффициент трения скольжения несколько ниже, чем при холодном.

Природа металлов и их структура играют важную роль при заедании. Чем больше отличаются свойства контактирующих металлов, тем меньше они склонны к схватыванию. Склонность к заеданию одноименных металлов уменьшается с увеличением различий в их структуре. Так, вероятность заедания стальных поверхностей снижается по мере увеличения различий в их химическом составе, термической обработки, твердости. Повышенной склонностью к заеданию обладают аустенитные коррозионно-стойкие стали, так как аустенитная структура является наиболее однородной. Более стойки к заеданию гетерогенные структуры, такие как мартенсит и особенно мелкопластинчатый перлит.

При температурах на контакте выше 800...850 °С обычно происходит резкое увеличение адгезионного износа. В этом случае большое влияние оказывают диффузионные процессы, характерные при обработке металлов резанием. Изменения в механизме изнашивания происходят в результате диффузионного растворения одного металла в другом и интенсивность адгезионно-диффузионного изнашивания возрастает.

5.6. ЭРОЗИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Эрозия – это процесс поверхностного разрушения вещества под воздействием внешней среды. Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа, пара, воздуха слагается из трения сплошного потока и его ударов о поверхность. В результате такого воздействия происходит расшатывание и вымывание отдельных зерен или микрообъема материала с поверхности детали.

Эрозионное изнашивание чаще всего наблюдается на лопатках паровых турбин, наружных поверхностях летательных аппаратов, разрушаемых под действием дождевых капель, деталей механизмов и устройств, предназначенных для очистки водой, газом высокого давления, резки материалов, дробления пород. Ин-

тенсивность эрозионного изнашивания прежде всего зависит от скорости потока, размера и формы капель жидкости и материала деталей.

5.7. ОКИСЛИТЕЛЬНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Окислительное изнашивание происходит под влиянием одновременно коррозионного и механического факторов.

Кислород воздуха или смазки, вступая во взаимодействие с металлом, образует на нем оксидную пленку, оказывающую значительное влияние на процессы трения и изнашивания. Механизм окислительного изнашивания состоит из ряда стадий: диффузии кислорода к поверхности металла; роста оксидной пленки; механического разрушения оксидной пленки при скольжении (качении) и далее стадии повторяются. Таким образом, окислительное изнашивание представляет собой изнашивание непрерывно возобновляемых оксидных пленок (рис. 5.24). В отличие от чистой коррозии, которая протекает в статических условиях, окислительное изнашивание связано всегда со скольжением, качением сопряженных деталей, т.е. подвержено динамическому воздействию.

По характеру протекания коррозионных процессов различают химическую и электрохимическую коррозию.

При химической коррозии наблюдается преимущественное развитие на поверхности металлов окислительных процессов с образованием оксидной пленки. Одним из главных факторов, ускоряющим этот процесс, является температура. С повышением температуры окружающей среды резко возрастает химическая коррозия.

К электрохимической коррозии относятся все случаи коррозии в водных растворах, при которых разрушение металлов может происходить в результате образования нерастворимых продуктов (ржавчины) или переход металла в раствор в виде ионов.

Для увеличения ресурса работы узлов трения в условиях коррозионно-механического изнашивания применяют коррозионно-стойкие стали с повышенным содержанием хрома (12...15 %) и никеля (от 8 % и выше). Введение в железо примерно 12 % хрома способствует резкому повышению электрохимического потенциала



Рис. 5.24. Коррозионно-механическое изнашивание диска шибровой задвижки (материал – чугун СЧ18, $\times 2$)

сплава. Такие сплавы ведут себя как благородные металлы. Они не ржавеют и не окисляются на воздухе, в воде, в ряде кислот, солей и щелочей.

В алюминиевые и магниевые сплавы для повышения коррозионной стойкости вводится марганец, что защищает их от межкристаллитной коррозии.

Другим эффективным средством является использование смазочных материалов с антикоррозионными присадками.

5.8. ВОДОРОДНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Водородное изнашивание как один из видов поверхностного разрушения деталей при трении открыто в 70-х годах прошлого столетия А.А. Поляковым и Д.Н. Гаркуновым [11]. Оно выражается в повышении концентрации такого окислителя, как водород, в поверхностных слоях деталей трибосопряжений с последующим процессом их интенсивного разрушения [31].

Водород является одним из наиболее легких и распространенных элементов на земле. Он имеет самый маленький размер атома ($r = 0,046$ нм) и массу ($1,7 \cdot 10^{-27}$ кг). В атомарном состоянии он об-

ладает исключительной подвижностью и проникающей способностью в кристаллических решетках металлов. Внедряясь через поверхностные дефекты внутрь металла, он вступает во взаимодействие с уже имеющимися там частицами водорода и объединяется с ними в молекулы.

Объединенные молекулы занимают большой объем, вследствие чего внутри металла создается повышенное напряженное состояние, особенно внутри наиболее глубоких и узких трещин. При достаточно большой концентрации водорода в поверхностном слое развиваются микронапряжения, превышающие прочность металла, вследствие чего происходит интенсивное его разрушение. Внешне это проявляется в виде поверхностного диспергирования (измельчения) материала или хрупкого растрескивания с последующим измельчением до мелкодисперсного порошкообразного состояния.

Такой вид изнашивания наиболее часто встречается в тормозных колодках и сопряженных с ними деталях, в деталях топливной аппаратуры и т. д.

При выборе материалов для трибосопряжений необходимо также учитывать их склонность к наводороживанию и, соответственно, охрупчиванию.

5.9. ИЗНАШИВАНИЕ ПРИ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ

Фреттинг-коррозия – это процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей пар металл–металл или металл–неметалл при их колебательных перемещениях (вибрации).

Фреттинг-коррозия является особой формой изнашивания и по условиям возникновения и характеру проявления имеет следующие отличия от обычного изнашивания при скольжении:

- а) вследствие малой амплитуды смещений удаление продуктов износа затруднено, поэтому повреждения поверхности локализованы на площади фактического контакта;
- б) малые скорости относительного перемещения;
- в) продуктами износа при фреттинг-коррозии металлов являются в основном их оксиды.



Рис. 5.25. Характер разрушения внутренней поверхности рессор грузового автомобиля (материал – сталь 65Г, $\times 6$):
1 – исходная структура металла; 2 – фреттинг-коррозия

Повреждения от фреттинг-коррозии проявляются в виде натиров, налипаний металла, вырывов или раковин, часто заполненных порошкообразными продуктами износа. Характерными также являются поверхностные микротрещины, чаще всего расположенные по периметру раковин (рис. 5.25).

Фреттинг-коррозии подвергаются: посадки с гарантированным натягом, шлицевые, шпоночные, болтовые соединения, соединения при помощи заклепок, рессоры, пружины и др. детали. В табл. 5.3 представлены данные о превалирующем влиянии фреттинг-коррозии на работоспособность рессор грузовых автомобилей [32].

5.3. Причины разрушения рессор

Причины разрушения	Количество рессор, вышедших из строя						Среднее значение за весь период, %
	1991 г.		1992 г.		1993 г.		
	шт	%	шт	%	шт	%	
Перегрузка	18	32,1	23	36,5	13	29,6	32,7
Разрушение вследствие фреттинг-коррозии	38	67,9	40	63,5	31	70,4	67,3

5.10. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Для электрических контактов характерны два основных вида изнашивания, которые обычно проявляются совместно: механическое (усталостное), обусловленное процессами трения и удара и электрическое (эрозионное), обусловленное воздействием электрического тока (часто дуги) на материалы (рис. 5.26).

В качестве примера деталей, где реализуется электроэрозионное изнашивание, можно привести следующие: прерыватели зажигания, электрошетки, контакты. Электрическая дуга (искра) обычно усиливает механический износ.

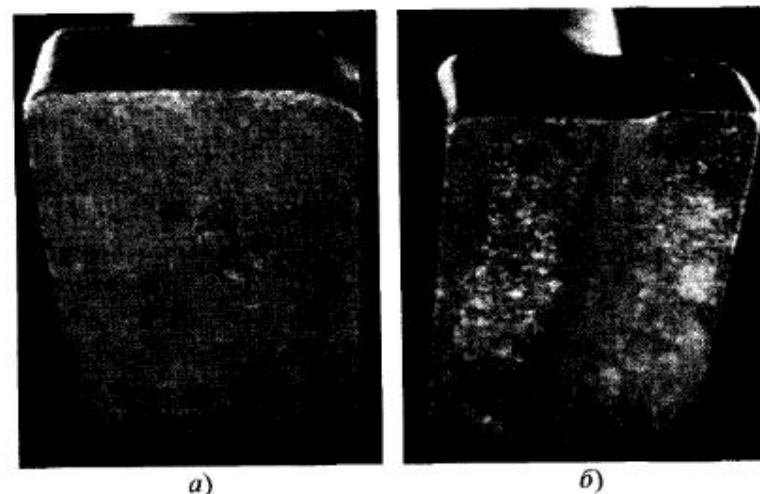


Рис. 5.26. Электроэрозионное изнашивание электрических контактов:
а – новый контакт; б – изношенный контакт
(материал – электротехническая медь, $\times 5$)

Глава 6

ФРИКЦИОННЫЕ, АНТИФРИКЦИОННЫЕ И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Условно принято называть материалы с коэффициентом трения $f > 0,2$ – фрикционными, а с $f < 0,2$ – антифрикционными.

Фрикционные материалы применяются в тормозах, муфтах сцепления, фрикционных механизмах, ременных и канатных передачах, на транспорте в виде колеса или рельса.

Антифрикционные материалы используются в подшипниках скольжения, направляющих, в системе поршневые кольца–цилиндр, электрических (часто размыкающихся) контактах и других устройствах.

6.1. ПРИРОДА ФРИКЦИОННОСТИ И АНТИФРИКЦИОННОСТИ

Природа фрикционности и антифрикционности обусловлена двойственной природой трения (наличие молекулярной и деформационной составляющих сил трения), а также тем, что в процессе трения твердых тел участвуют лишь поверхностные слои, свойства которых (твердость, прочность на сдвиг) могут заметно отличаться от объемных свойств. Совокупность этих требований, отличающих граничный слой от объема материала, сводится к необходимости создания на контакте положительного градиента механических свойств.

Фрикционные материалы должны иметь высокий коэффициент трения, а антифрикционные, наоборот, низкий. Фрикционный материал обладает низким модулем упругости при упругом контакте или низкой твердостью – при пластическом. Это обеспечивает повышение адгезионной составляющей коэффициента трения за счет увеличения фактической площади контакта и высокое значе-

ние деформационной составляющей коэффициента трения за счет низкого модуля упругости и, соответственно, более глубокого внедрения неровностей.

У антифрикционных материалов площадь фактического контакта невелика и, по возможности, формируется за счет упругой деформации микронеровностей. Для этого антифрикционный материал должен иметь достаточную твердость и высокий модуль упругости. Следует стремиться к снижению относительного внедрения (h/R) и гистерезисных потерь ($\alpha \ll 1$).

Помимо требований, исходящих из назначения, к фрикционным и антифрикционным материалам предъявляются дополнительные требования:

- способность легко подвергаться механической обработке, простота технологии получения и отсутствие в их составе дорогих компонентов;
- стабильное значение коэффициента трения;
- способность быстро прирабатываться и иметь низкий износ;
- обладать коррозионной стойкостью, теплостойкостью, хорошей теплопроводностью и иметь низкий коэффициент теплового расширения;
- продукты износа не должны быть абразивными, токсичными и опасными в пожарном отношении.

Кроме того, фрикционные материалы в ходе торможения не должны загораться открытым пламенем, набухать при наличии влаги, коэффициент трения должен укладываться в интервал $0,2 \dots 0,5$.

Антифрикционные материалы должны быть прочными, обеспечивая преимущественно упругий контакт, сохранять работоспособность узла трения при надежной смазке, хорошо смачиваться смазочными материалами и иметь низкий коэффициент трения.

6.2. ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Положительный градиент механических свойств у фрикционных материалов достигается двумя путями. Первый путь заключается во введении в контактный слой промежуточного пластическо-

го слоя, у которого сопротивление сдвигу ниже, чем у взаимодействующих тел. Этот слой может образовываться из пластических веществ металлического и неметаллического происхождения, оксидных пленок, твердых смазок. Второй путь – применение в качестве фрикционного такого материала, который под действием сдвигающих напряжений и высоких температур в зоне контакта размягчается. При этом на поверхности трения возникает пластичная пленка.

На практике существуют следующие виды *фрикционных* материалов: металлические, асбокаучуковые, асбосмоляные, органические, металлокерамические. Контртелом обычно служат прошедшие термообработку стали с высоким содержанием углерода и легированные, а также чугун.

К металлическим фрикционным материалам относятся серые чугуны, работающие обычно в паре с высокоуглеродистыми сталями типа У7, У8. В чугунах содержится углерод в виде графита, который вместе с продуктами износа создает на контакте пленку, обладающую пониженным сопротивлением сдвигу. Недостатком таких пар является сравнительно малый коэффициент трения, а достоинством – низкая стоимость. Указанная пара применяется в тормозах колес железнодорожного транспорта.

Асбокаучуковые материалы широко применяются в муфтах сцепления, тормозах автомобилей, тракторов и других машин. В их состав входят: асбест, каучук, сурик железный, сера, оксид цинка, свинец, латунная стружка, канифоль и др. Асбест, обладая волокнистой структурой, создает каркас изделия и весьма теплоустоек. Его коэффициент трения обычно составляет 0,7...0,8 и мало зависит от температуры. Каучук связывает все компоненты и обладает высоким коэффициентом трения. Сурик и оксид цинка весьма пластичны и способствуют образованию поверхностного слоя, обладающего противозадирными свойствами. Однако у этих материалов коэффициент трения уменьшается при температурах выше 200...250 °С из-за размягчения каучука (рис. 6.1). Вторым недостатком является также то, что при температуре порядка 400 °С материал вспыхивает (горит каучук).

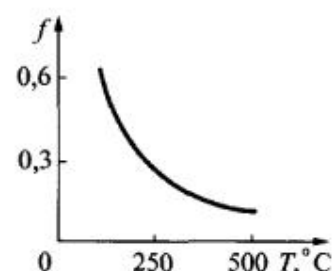


Рис. 6.1. Влияние температуры на коэффициент трения асбокаучуковых материалов

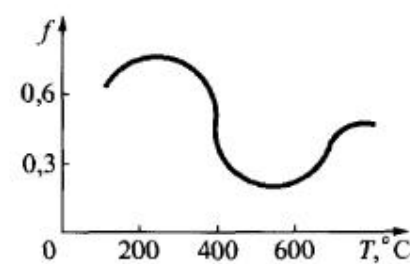


Рис. 6.2. Влияние температуры на коэффициент трения асбосмоляных материалов

Асбосмоляные материалы, в отличие от асбокаучуковых, имеют связующее в виде синтетических смол, например, эпоксидной. Эти смолы при термическом распаде ведут себя иначе, чем каучуки. Продукты распада образуют пленку кокса. У кокса обычно пористая структура, которая заполняется продуктами распада. С ростом температуры коэффициент трения таких материалов падает (рис. 6.2) и при 400...500 °С проходит через минимум, затем возрастает. Типичными асбосмоляными материалами являются ретинаксы (ФК-24А, ФК-16Л), в которые вводится латунная проволока, улучшающая структуру промежуточного слоя.

Применяется ретинакс в тяжело нагруженных тормозах (буровые лебедки, авиаколеса). Общим недостатком асбокаучуковых и асбосмоляных фрикционных материалов является наличие асбеста, т. к. он является 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».

Органические фрикционные материалы (дерево, кожа, пробка, резина) применяются в слабонагруженных узлах трения, чаще – в приборах. Общим недостатком этих материалов является низкая теплопроводность, теплостойкость, высокая стоимость и низкая нагрузочная способность.

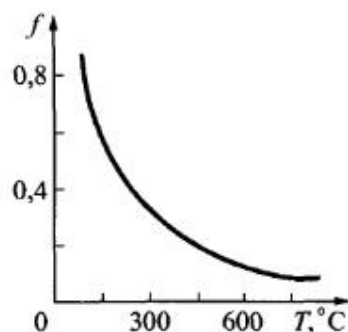


Рис. 6.3. Влияние температуры на коэффициент трения металлокерамических материалов

Металлокерамические материалы получают методом порошковой металлургии: прессованием с последующим спеканием или наплавкой порошковой проволоки, взрывом. Такие материалы весьма термостойки, т. к. основа их может быть медная и железная. Однако они склонны к схватыванию и имеют резко выраженную падающую характеристику $f - T$ (рис. 6.3). Наибольшее распространение получила металлокерамика ФМК-11 ($f = 0,21 \dots 0,27$, $T = 400 \dots 600$ °C), имеющая в своем составе, масс. доля, %: Fe – 64, Cu – 15, графита – 8, SiO₂ – 3 и асбеста – 3; а также МК-5 ($f = 0,25 \dots 0,27$, $t = 300 \dots 500$ °C), содержащая, масс. доля, %: Cu – 68, Sn – 68, Pb – 9, Fe – 3, графита – 9.

Перспективным является применение пористых металлокерамических материалов, пропитанных различными полимерами.

6.3. АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Антифрикционными называются материалы, которые при трении даже в тяжелых условиях нагружения имеют сравнительно небольшой коэффициент трения и мало изнашиваются. Наиболее многочисленной группой антифрикционных материалов являются материалы, предназначенные для подшипников скольжения. Понятие «антифрикционность» включает комплекс свойств, которым должен удовлетворять подшипниковый материал: достаточную статическую и динамическую прочность при повышенных температурах; способность образовывать прочный граничный слой сма-

зочного материала и быстро восстанавливать его в местах, где он разрушен; низкий коэффициент трения при несовершенной смазке, отсутствие заедания на валу в случае перерыва в подаче смазочного материала; высокие теплопроводность, теплоемкость, прирабатываемость, хорошую износостойкость сопряжения; недефицитность и высокую технологичность.

Следует отметить, что подшипниковых материалов, удовлетворяющих всем этим требованиям, нет. Так, прочность оловянистых баббитов снижается с повышением температуры, прирабатываемость бронз неудовлетворительная, неметаллические антифрикционные материалы имеют низкую теплопроводность.

Критерием оценки антифрикционных подшипниковых материалов является условие их работы. Поэтому существует и определенная трудность при выборе подшипниковых материалов. Необходимо знать условия эксплуатации, основные свойства самих материалов сопряжения и третьего тела, в частности, смазки.

Существуют следующие виды антифрикционных материалов: металлические, природные, полимерные, самосмазывающие композиции и металлокерамические.

Среди металлических наиболее известны – баббиты (названы в честь автора этих сплавов – Баббита). Первые баббиты – это сплав олова, сурьмы и меди, затем – баббиты на основе свинца с добавлением меди, сурьмы, мышьяка, кадмия, никеля. Наиболее широко применялись и сейчас применяются для вкладышей баббиты типа Б-83 (83 % олова, остальные – сурьма и медь) для давлений до 10 МПа, окружных скоростей до 50 м/с и рабочих температур до 70 °C, они очень хорошо прирабатываются и имеют коэффициент трения $f \leq 0,005$ со смазкой.

Сплавы на основе меди: бронза – это сплав меди с оловом, латунь – сплав меди с цинком. Бронзы до настоящего времени являются основными материалами тихоходных подшипников скольжения, венцов червячных зубчатых колес. Латунни используются реже.

Сплавы на алюминиевой основе имеют два вида добавок: тугоплавкие (хром, железо, марганец, кремний) и легкоплавкие (олово, сурьма, свинец, кадмий, магний). Преимущества этих сплавов: невысокая стоимость, прочность, хорошая теплопроводность, вы-

сокая коррозионная стойкость и низкая плотность. Недостатки: значительный коэффициент теплового расширения и способность к схватыванию.

В последние годы разработаны сплавы на основе алюминия с высоким содержанием свинца или олова. Такие сплавы, кроме всего прочего, обладают низким схватыванием и достаточно высокой задиристостью. В современном автомобиле- и тракторостроении распространение получил сплав АО20-1 (массовая доля, %: Са – 1, Sn – 20, Ti – 0,02...0,1, Al – остальное). Биметаллические вкладыши изготавливаются путем совместной прокатки с последующей штамповкой вкладышей из полосы.

К антифрикционным чугунам относятся: серый чугун с пластинчатым графитом, модифицированные чугуны с глобулярным графитом, ковкие чугуны, обладающие высокой пластичностью. С повышением содержания графита повышаются антифрикционные свойства чугуна. Недостаток – низкая износостойкость и высокий коэффициент трения. Поэтому чугуны применяют в малоответственных узлах трения при низких нагрузках и скоростях скольжения. Чугуны находятся на границе фрикционных и антифрикционных материалов.

К числу природных антифрикционных материалов относятся: древесина, драгоценные камни и т. д. Драгоценные камни успешно применяются в качестве опор скольжения в часовой промышленности. Они имеют низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. В чистом виде древесина применяется редко, обычно она пропитывается различными смазками и после пропитки пресуется. Применяется для подшипников скольжения в качестве поверхности трения поперечным срезом, на которую выходят сокопроводящие каналы. По этим каналам смазка или самосмазывающиеся добавки выходят на контакт и образуют защитный слой с положительным градиентом механических свойств. Преимущества обогащенной древесины: легко прирабатывается, мало изнашивается, самосмазывается, имеет невысокую стоимость. Недостатки: низкая твердость и теплопроводность, набухает, впитывает влагу.

Преодолеть недостатки древесины путем металлизации удалось в значительной степени В.А. Белому с сотрудниками

(АН Беларусь). В результате плотность возросла в 3 раза, влагоемкость снизилась в 18...25 раз, теплопроводность возросла в 20 раз. Металлизация обычно сочетается с пропиткой полимерными смолами. Разработанные композиционные материалы на основе древесины имеют низкий и устойчивый коэффициент трения, малый износ.

Полимерные (искусственные) антифрикционные материалы изготавливаются на основе полиамидов и карбоцепных полимеров, фенолформальдегидных и эпоксидных смол, фторопласта. Полиамиды (капрон, нейрон), карбоцепные полимеры (полиэтилен) являются термопластичными полимерами, обладают довольно высокими механическими свойствами, технологичны и применяются в качестве втулок скольжения. Фенолформальдегидные и эпоксидные смолы чаще всего используются в качестве основы и наполняются графитом, дисульфидом молибдена и др. Детали на основе эпоксидных смол обладают хорошей адгезией к металлам, химической стойкостью, повышенной механической прочностью. Для антифрикционных материалов чаще всего используются смолы ЭД-5, ЭД-6, ЭД-П, ЭД-Л.

Большой интерес для создания антифрикционных полимеров представляет фторопласт. Макромолекула этого полимера представляет собой углеродную цепь, к которой присоединены в качестве боковых звеньев атомы фтора, в отличие от полиэтилена, у которого боковыми звеньями являются атомы водорода. Электроотрицательные атомы фтора экранируют углеродную цепь и макромолекулы слабо взаимодействуют друг с другом. Поэтому фторопласт химически инертен, не способен сорбировать влагу, обладает высокой пластичностью, низким модулем упругости и очень низким коэффициентом трения. Он теплостоек и термопластичен. Обычно во фторопласт вводится прочный каркас из металла или стекловолокна. Из металлофторопластовой полосы изготавливают вкладыши подшипников скольжения.

В самосмазывающиеся материалы включают обычно в качестве основного компонента графит и дисульфиды, диселениды, дителуриды металлов (MoS_2 , WSe_2 , MoTe_2) и другие соединения. Все перечисленные твердые смазки имеют слоистое строение. По-

этому слои материалов легко скользят относительно друг друга. На практике наибольшее распространение получили материалы на основе графита и дисульфида молибдена. Из молибденита и графита в смеси с другими компонентами изготавливают сложные комбинированные самосмазочные композиции (в России ПАМ-15-69, ПАМ-15-67). Одна из американских фирм выпускает материал, состоящий из графита, молибденита, золота и силиката натрия. Этот материал обеспечивает работоспособность вкладыша подшипника в вакууме в интервале температур от -60°C до $+800^{\circ}\text{C}$ при давлении на контакте до 300 МПа и имеет $f \approx 0,1$.

Высоким качеством обладают антифрикционные материалы типа АМАН. Эти материалы являются композицией полимерных смол с твердосмазочными компонентами и металлами. Они изготавливаются методом прессования и эпоксидными клеями приклеиваются к несущей поверхности деталей узлов трения. Эти материалы имеют высокие механические, тепловые, антифрикционные характеристики и применяются широко в машиностроении в качестве подшипников и т.д.

Антифрикционная металлокерамика обладает малым коэффициентом трения и высокой износостойкостью, может работать без смазки в условиях загрязнения твердыми частицами. Выпускаются пористые сплавы на основе железа и графита (железографит), бронзы и графита (бронзографит), алюминия и графита (алюминографит), а также серебра и меди с графитом и др. Вместо графита могут использоваться и другие твердые (слоистые) смазки: молибденит, диселениды металлов, нитрид бора. Железографит наиболее распространен и выдерживает давление до 15 МПа при $T = 80 \dots 100^{\circ}\text{C}$. Сплавы на основе железа, меди и других металлов пропитывают различными полимерами, в основном фторопластом. Используются при тех же условиях, что и железографит при температурах до 150°C в виде двухслойных (свинцовая бронза) или трехслойных лент. На металлическую подложку напекается один или два слоя порошка соответствующего материала. Технология получения такой ленты включает смешение порошков, прессование, спекание, пропитку, механическую обработку. Во всех случаях при трении при достаточно податливой основе на поверхности

металлокерамического материала образуется слой, обладающий положительным градиентом механических свойств с низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. Из этих материалов изготавливают подшипники скольжения, сепараторы, уплотнения, подвижные электрические контакты и т.д.

В современной технике получили широкое применение антифрикционные покрытия, наносимые на поверхность деталей трибосопряжения. Покрытия могут быть полимерными и металлическими, из твердых смазок, из оксидов или других соединений. Пленка должна иметь высокую адгезию к поверхности детали и близкий к материалу детали коэффициент теплового расширения, хорошую теплопроводность, низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. Технологии покрытий довольно сложны и постоянно совершенствуются. Так, например, подшипники для некоторых механизмов космической техники изготавливаются из титана, покрытого молибденитом. Это происходит при синтезе такой пленки. Титановые пластины покрывают молибденитом и помещают в вакуумную печь, где нагревают до 600°C и одновременно обдувают парами серы. Сера вступает в связь с молибденитом, и на титане возникает пленка из дисульфида молибдена толщиной примерно 50 мкм. Потом из этих пластин изготавливают вкладыши или сами подшипники. Они обычно не нуждаются в смазке.

6.4. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для снижения трения и изнашивания разнообразных узлов трения в технике широко используют смазочные материалы. Смазочные материалы служат для отвода тепла из зоны трения, для защиты рабочих поверхностей деталей от коррозии, кроме того, они обеспечивают герметизацию узлов трения, очищают детали от загрязняющих отложений, нагара, продуктов износа и т.д. От правильного подбора смазочного материала и его качества во многом зависит долговечность машины. В зависимости от физического состояния различают: газообразные, жидкие, пластичные и твердые смазки. В настоящее время наиболее широкое применение

в машинах и механизмах нашли жидкие смазки, называемые смазочными маслами.

Смазочные масла классифицируют по назначению и области применения:

- моторные, применяемые для двигателей внутреннего сгорания;
- трансмиссионные, применяемые для смазки элементов трансмиссий, транспортных средств;
- индустриальные, применяемые для смазки промышленного оборудования, а также в качестве рабочих жидкостей гидросистем.

Физико-химические свойства смазочных материалов (СМ) – это регламентированные стандартами показатели для оценки качества масел.

Таковыми показателями являются:

- плотность номинальная (при заданной температуре);
- вязкость номинальная (обычно при 50 и 100 °С);
- температура вспышки – наиболее низкая температура вспышки паров нагреваемого СМ при приближении пламени в условиях обычного давления;
- температура застывания – наиболее высокая температура, при которой масло теряет текучесть;
- кислотное число (КОН) – количество миллиграммов едкого калия, которое требуется для нейтрализации ГСМ;
- коксуемость – отношение (в %) массы кокса к навеске испытуемого СМ;
- зольность – наличие в СМ несгораемых веществ;
- содержание механических примесей;
- содержание воды;
- содержание водорастворимых кислот и щелочей;
- коррозионное воздействие на Fe, Cu;
- содержание растворителей (фенола, крезола, нитробензола и фуртурола, применяемых при селективной очистке СМ).

Все показатели прямо или косвенно характеризуют поведение СМ в эксплуатации либо служат для контроля их качества при производстве, транспортировании и хранении.

Масла представляют собой смесь различных компонентов, каждый из которых выполняет определенные функции. Обычно

90 % объема приходится на долю базового масла, остальные 10 % – различные присадки и наполнители. В качестве базовых масел широко применяются минеральные (нефтяные), синтетические и жировые масла.

Наибольшее распространение получили нефтяные масла. Синтетические масла пока дорогие и поэтому применяются только для специальных видов техники. Жировые масла растительного или животного происхождения самостоятельно почти не используются. Их применяют в качестве присадок к нефтяным маслам.

Присадки – это различные химические соединения, составляющие незначительную долю (0,002...5 %), но резко улучшающие свойства масел (касторовое, вазелиновое масла, глицерин, олеиновая, стеариновая кислоты и т.д.).

По своему назначению присадки разделяются на:

- а) моющие – для удаления продуктов окисления масла с поверхности трения;
- б) противоокислительные – для замедления процессов окисления масел;
- г) противозадирные – для образования прочных пленок на трущихся поверхностях, которые препятствуют схватыванию;
- д) антикоррозийные – для защиты металлов от коррозии;
- е) антифрикционные – для уменьшения величины коэффициента трения (животные и растительные жиры, соединения серы, соединения фосфора и т.д.);
- ж) противоизносные – для уменьшения износа поверхностей (соли бария, цинка и др.);
- з) многофункциональные.

В последнее время большое внимание исследователей привлекают многофункциональные или так называемые трибополимеризующие присадки, создающие одновременно противоизносные, противозадирные, антифрикционные действия. Они образуют полимерные пленки на поверхностях трибосопряжений. За этими присадками будущее.

Моторные масла используют в двигателях внутреннего сгорания с целью уменьшения трения, износа и предотвращения задира трущихся поверхностей. Моторные масла разделяются: по кинема-

тической вязкости при 100 °С на 21 класс ($3,82 < \nu < 22 \text{ мм}^2/\text{с}$); по сезонности применения (летние, зимние, всесезонные); по типу двигателя и степени его форсирования.

Маркировка отечественных моторных масел состоит из группы знаков. Например, М 6₃/12-Г₁: моторное; шестой класс вязкости (ν не превышает $10\,400 \text{ мм}^2/\text{с}$ при -18 °С); индекс 3 при цифре 6 указывает, что в масло введена защищающая присадка; цифра 12 после знака дроби показывает, что вязкость масла при 100 °С равна $12 \text{ мм}^2/\text{с}$; буква Г с индексом 1 указывает на возможность его использования в высокофорсированных двигателях. В табл. 6.1 приведены основные характеристики моторных масел для карбюраторных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и дизелей.

6.1. Основные характеристики моторных масел для карбюраторных двигателей внутреннего сгорания и дизелей

Показатели	Масла для ДВС			Масла для дизелей		
	М-8-В ₁	М-6 ₃ /10-Г ₁	М-12-Г ₁	М-8-Г ₂	М-10-Г ₂	М-10-Г ₂ К
Вязкость кинематическая, $\text{мм}^2/\text{с}$:						
при 100 °С	8	10	12	8	11	11
при 0 °С	1200	1000	—	1200	—	—
Индекс вязкости	90	125	95	90	90	90
Температура, °С:						
вспышки	200	210	220	200	205	205
застывания	-25	-30	-20	-25	-15	-15
Щелочное число, мг КОН/г	4,0	10,5	8,5	6,0	6,0	6,0
Зольность сульфатная, %	0,95	1,65	1,3	1,65	1,65	1,15

Срок службы синтетических масел составляет 80...100 тыс. км пробега автомобиля без смены масла, против 20 тыс. км пробега автомобиля с минеральными маслами. Стоимость синтетических масел в 2...3 раза выше, чем у масел на нефтяной основе.

Трансмиссионные масла используются в коробках перемены передач, ведущих мостах и др. агрегатах. Эти механизмы имеют большое количество различных зубчатых передач, подшипников качения и скольжения, шлицевых соединений. Условия их работы — высокие контактные напряжения (до 2000 МПа), скорость скольжения до 3 м/с, температура масла до 80...100 °С.

Трансмиссионные масла имеют 4 класса вязкости с диапазоном от 6 до $41 \text{ мм}^2/\text{с}$ при 100 °С. В зависимости от смазывающих свойств они разделены на 5 групп по эксплуатационным требованиям и областям применения (ТМ-1, ТМ-5).

В табл. 6.2 приведены физико-химические свойства отдельных групп трансмиссионных масел.

6.2. Основные характеристики трансмиссионных масел

Показатели	Группа ТМ-3		Группа ТМ-4		Группа ТМ-5	
	ТСп-10	ТАп-15	ТСп-14тип	ТС гип	ТАД-17И	ТМ5-12рк
Вязкость кинематическая при 100 °С, $\text{мм}^2/\text{с}$	10	15	14	21...32	17	12
Температура, °С:						
вспышки	128	180	180	—	200	180
застывания	-40	-20	-25	-20	-25	-45
Смазывающие свойства на четырехшариковой машине трения: нагрузка заедания, Н	3500	2800	4640	7750	3750	3350
Диаметр пятна изнашивания, мм	0,94	0,60	0,86	0,87	0,4	0,4

К числу перспективных трансмиссионных масел следует отнести синтетические масла. Типичное синтетическое масло имеет вязкость $7,1 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $100 \text{ }^\circ\text{C}$, температуру вспышки $230 \text{ }^\circ\text{C}$, температуру застывания $-57 \text{ }^\circ\text{C}$. Стоимость его в 3...4 раза выше, чем минеральных масел, что сдерживает их широкое применение в технике.

Индустриальные масла представляют группу нефтяных масел более 90 наименований с объемом производства свыше 30 % от общей выработки нефтяных масел. Они предназначены для смазывания металлорежущих станков, прессов, прокатных станов, насосов, приборов, гидросистем и др.

По назначению их делят на 4 группы: Л – для легконагруженных узлов трения; Г – для гидравлических систем; Н – для направляющих скольжения; Т – для тяжело нагруженных узлов трения (зубчатые передачи). По эксплуатационным свойствам и составу индустриальные масла делят на четыре группы, обозначаемых буквами: А – без присадок; В – с антиокислительными и антикоррозионными присадками; С – дополнительно с противоизносными присадками; Д – дополнительно с противоскачковыми присадками. Эти масла имеют 18 классов вязкости с диапазоном $\nu = 1,9...1650 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Маркировка масел включает перечисленные выше индексы. Например, И-Г-А-32 означает индустриальное масло для гидравлических систем, без присадок, 32-й класс вязкости ($\nu = 29...35 \text{ мм}^2/\text{с}$). Некоторые характеристики индустриальных масел приведены в табл. 6.3.

Пластичные (консистентные) смазки представляют собой минеральные масла (густые мази), загущенные солями высших жирных кислот – мылами. Они в основном предназначены для смазывания подшипников качения, шарниров, рычажных, кулачковых систем и др. Пластичные смазки обладают следующими преимуществами: удерживаются на наклонной и вертикальной поверхностях, не выдавливаются из контакта, обладают хорошей смазочной способностью в довольно широком интервале температур, способны герметизировать узел, обеспечивают малый расход смазки, позволяют упростить конструкцию узла, снизить металлоемкость,

6.3. Основные характеристики индустриальных масел с присадками

Показатели	Масла					
	ИГП	ИГСл	ИГНСл	ИНСл	ИСП	ИРл
Кинематическая вязкость при $50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{мм}^2/\text{с}$	2,2...190,0	16,5...40,0	19,0...42,0	36,0...120,0	23,7...118,5	36,0...140,0
Температура вспышки, $^\circ\text{C}$	90...240	180...210	170...210	190...200	190...210	190...210
Температура застывания, $^\circ\text{C}$	-8...15	-8	-15	-15...20	-10	-10
Щелочное число, мг КОН/г	0,2	0,2	0,2	3,3	0,1	0,2
Смазывающие свойства:						
индекс задира ИЗ	23...24	25	27...31	28...36	44...49	40...50
диаметр пятна износа, мм (196 Н, 1 ч)	0,40...0,45	0,40...0,45	0,40...0,45	0,99...0,99	0,45...0,99	0,70...0,90

сократить затраты на обслуживание, меньшее загрязнение окружающей среды. К числу недостатков относятся: низкий теплоотвод, отсутствие удаления продуктов изнашивания, худшая работа при отрицательных температурах.

Пластичные смазки обычно набиваются в полости узлов трения. Замена смазки проводится во время техобслуживания. В зависимости от состава пластичные смазки разделяются на: кальцевые, натриевые, смешанные (кальциево-натриевые) и смазки с металлической основой, загущенные алюминиевыми, магниевыми и другими мылами.

Кальцевые смазки (солидолы) в воде не растворяются. Их можно применять в условиях влажной среды, но они не могут работать при температуре выше 55 °С.

Натриевые смазки (консталины) плавятся только при 100... 200 °С, застывая после расплавления, и при охлаждении восстанавливают свои свойства. Но эти смазки легко растворяются в воде, особенно при повышенной температуре и корродируют металлы.

Кальциево-натриевые применяют при повышенной температуре и небольшой влажности. Свойства их промежуточные.

Литиевые смазки получают из отходов ядерной энергетики (из изотопа лития). В России литиевые смазки (литол-24, фиол-1, фиол-2у, шрус-4 и др.) широко используются как единая смазка в основных узлах автомобилей.

К твердосмазочным материалам относятся вещества, наносимые на поверхность деталей в виде пленок, имеющие сдвиговую прочность значительно меньшую, чем у материала детали, т.е. обеспечивающие положительный градиент сдвиговой прочности.

Твердые смазочные материалы обеспечивают благоприятные условия изнашивания, образуя на рабочих поверхностях деталей разделительные пленки, устраняющие схватывание и механические повреждения. В качестве твердых смазок применяются металлы с низкой температурой плавления (свинец, сурьма, висмут) и вещества со сложной структурой кристаллической решетки (графит, сульфиды молибдена, меди, цинка). Наиболее широко используются дисульфиды молибдена MoS_2 , вольфрама WS_2 , графит. Их наносят на рабочие поверхности деталей в виде тонких

пленок (втирают) или используют как порошкообразные добавки к смазочным суспензиям.

Весьма целесообразно использовать приемы пополнения твердых смазок путем применения самосмазывающихся материалов подшипников, реализации ротапринтного метода способа смазки, а также удерживания твердой смазки с помощью магнитного поля [26, 27].

6.5. ВЫБОР СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ УЗЛА ТРЕНИЯ

Узел трения представляет собой трибологическую систему, в которой материалы деталей, смазочный материал и параметры режима работы должны быть взаимосвязаны с целью получения минимальных значений коэффициента трения и интенсивности изнашивания, и, соответственно, максимального ресурса его работы.

Рассмотрим последовательность выбора смазочного материала, предложенную В.Г. Павловым, на примере подшипника скольжения [31].

В соответствии с диаграммой Герси-Штрибека (см. рис. 1.8) условия смазки в подшипниковом узле определяются безразмерным числом Зоммерфельда:

$$S_0 = \frac{p\psi^2}{\eta\omega}, \quad (6.1)$$

где p – среднее давление в подшипнике; $\psi = (d_{\text{вн}} - d_0)/d_0$ – относительный зазор в подшипнике; $d_{\text{вн}}$ и d_0 – диаметры втулки и вала подшипника; η – коэффициент динамической вязкости масла; ω – угловая скорость вращения вала.

На графике рис. 1.8 имеется критическая точка B , которой соответствует предельный режим существования гидродинамического режима смазки. Этот режим характеризуется предельным числом $[S_0]$. Из условия $S_0 \leq [S_0]$ определяется минимально необходимая вязкость масла:

$$\eta_{\text{min}} \geq \frac{p\psi^2}{\omega[S_0]}. \quad (6.2)$$

Для $[S_0]$ составлены таблицы, по которым эта величина устанавливается в зависимости от диаметра вала подшипника d_b , относительного зазора ψ и величины l/d , где l – длина подшипника [46].

По расчетным величинам η из справочной литературы выбирается марка масла и значение динамической вязкости при заданной температуре работы механизма [37, 46].

Обычно рабочая температура масла θ_p должна находиться в пределах 50...100 °С. Поскольку вязкость масла сильно зависит от температуры, то проводят тепловой расчет подшипника с целью выявления возможного перегрева масла. Расчет ведется на основе уравнения теплового баланса подшипника [37].

Для этого определяется количество тепла, образующегося в подшипнике за счет сил трения в секунду,

$$Q_1 = fF_n v; \quad (6.3)$$

количество тепла, отводимого нагретым маслом в секунду,

$$Q_2 = c\rho V(\theta_{\text{вых}} - \theta_{\text{вх}}); \quad (6.4)$$

и количество тепла, отводимого путем конвекции корпусом подшипника,

$$Q_3 = \alpha_s A(\theta_n + \theta_b), \quad (6.5)$$

где f – коэффициент трения; F_n – нагрузка; v – окружная скорость вала подшипника; C и ρ – теплоемкость и плотность масла; V – объем масла, прокачиваемый через подшипник в единицу времени; α_s и A – коэффициент конвективной теплоотдачи и площадь поверхности подшипника; $\theta_{\text{вых}}$ и $\theta_{\text{вх}}$ – температура масла на выходе и входе в подшипник; θ_n и θ_b – температура корпуса подшипника и окружающего воздуха.

Общее уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q_1 = Q_2 + Q_3. \quad (6.6)$$

Подставляя значения выражений (6.3), (6.4), (6.5) в (6.6) и решая это уравнение относительно $\Delta\theta = (\theta_{\text{вых}} - \theta_{\text{вх}})$, определяют приращение температуры масла при прохождении его через рабо-

чую зону подшипника. При циркуляционной смазке основное количество тепла отводится от подшипника через смазочный материал. В этом случае из приближенного равенства $Q_1 \approx Q_2$:

$$\Delta\theta = (\theta_{\text{вых}} - \theta_{\text{вх}}) = \frac{fF_n v}{c\rho V}. \quad (6.7)$$

Определение величин, входящих в формулу (6.7), производится следующим образом. Рассчитывается коэффициент нагруженности подшипника при рабочей температуре θ_p :

$$C_F = \frac{p\psi^2}{\omega\eta_0}, \quad (6.8)$$

где η_0 – коэффициент динамической вязкости выбранного масла при θ_p .

Далее по таблице для C_F [37] в зависимости от отношения l/d и угла обхвата подшипникового узла (120°, 180°) определяется величина относительного эксцентриситета подшипника $\chi = e/\delta$ и рассчитывается толщина масляного слоя:

$$h_{\text{min}} = \delta(1 - \chi), \quad (6.9)$$

где $\delta = (d_{\text{вт}} - d_b)/2$ – радиальный зазор подшипника; l – абсолютный эксцентриситет вала в подшипнике.

Вычисляется коэффициент безопасности по толщине масляного слоя:

$$\Phi = \frac{h_{\text{min}}}{Rz_1 + Rz_2} \geq 2, \quad (6.10)$$

где Rz_1 и Rz_2 – средние высоты микронеровностей поверхностей вала и втулки.

Если условие (6.10) соблюдается, то в подшипнике скольжения реализуется режим гидродинамической смазки.

Коэффициент трения скольжения:

$$f = \psi \left[\frac{\pi}{C_F \sqrt{1 - \chi^2}} + 0,438\chi\sqrt{1 - \chi^2} \right]. \quad (6.11)$$

Угловая и окружная скорости вала:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}; \quad v = \frac{\omega d}{2}.$$

Расход масла в подшипнике при работе его с большим эксцентриситетом (режим тяжелого нагружения) составляет:

$$V = 0,5\psi\omega ld^2 \frac{\pi}{12} (1 + 4\chi^2) C_F \left(\frac{d}{l}\right) \frac{p_e}{p}, \quad (6.12)$$

где p_e – давление подачи смазки (обычно $p_e = 0,05 \dots 0,2$ МПа);
 p – среднее давление в подшипнике,

$$p = F_n / (ld).$$

Температура $\Delta\theta$, вычисленная по формуле (6.7), складывается с температурой окружающего воздуха θ_a . Сумма этих температур должна быть равна выбранной ранее рабочей температуре масла $\theta_p = \Delta\theta + \theta_a$. Если это равенство нарушится, то надо изменить условия работы подшипника (нагрузку F_n , скорость v , объем масла V или площадь A).

Глава 7

ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН

При определении основных требований к износостойкости материалов для большинства трибосопряжений исходят из того, что при изготовлении и эксплуатации узлов трения необходимо обеспечить:

- максимальные или заданные значения прочности, жесткости, надежности и долговечности;
- минимальную массу, уровень шума и энергетические потери;
- низкую металлоемкость, высокую технологичность и минимальную стоимость;
- удобство монтажа и техобслуживания.

В широком смысле основные способы повышения долговечности (износостойкости) машин можно условно подразделить на три основные группы: конструкционные, технологические и эксплуатационные.

7.1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СПОСОБЫ

Систематизация конструктивных решений, направленных на обеспечение износостойкости деталей машин, представляет большой интерес для машиностроения, но является очень сложной задачей, т. к. может насчитывать десятки тысяч предложений и вариантов решения. В этой связи рассмотрим отдельные из них.

Исключение внешнего трения. Конструктивных решений, позволяющих исключить внешнее трение сопряженных деталей, достаточно много. Так, например, отсутствует внешнее трение в мембранных насосах, предназначенных для перекачивания жидкостей. Резиновые мембраны применяются в поршневых насосах.

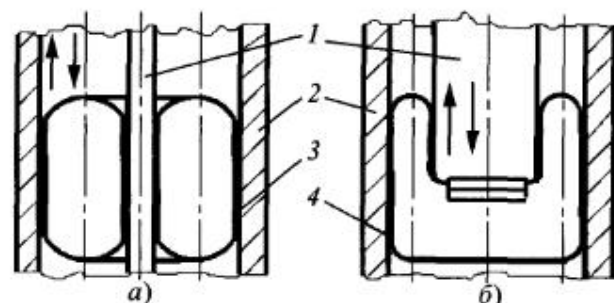


Рис. 7.1. Схема эластичного поршня (а) и манжеты штока (б)

На рис. 7.1, а показан эластичный поршень, представляющий собой тонкостенную оболочку 3 в виде тора из прорезиненной ткани и легко перемещающийся в цилиндре 2 при избыточном давлении воздуха около 0,02 МПа. Движение штока 1 в цилиндре осуществляется в результате деформации стенок оболочки и не сопровождается изнашиванием.

Еще один пример использования резиновых деформирующих элементов в качестве уплотнения штока гидроцилиндра показан на рис. 7.1, б. Тонкостенная резиновая трубка 4, концы которой плотно заделаны на торцах штока 1 и цилиндра 2, создает возможность перемещения штока без трения о цилиндр и обеспечивает герметичность соединения при давлении жидкости 0,5...1,0 МПа.

Замена внешнего трения на внутреннее трение. Этот конструктивный способ осуществляется в резинометаллических шарнирах, широко применяется в технике и особенно на транспорте. Относительное возвратно-вращательное движение коаксиальных деталей осуществляется за счет деформации резинового элемента, привулканизованного к сопряженным деталям. Благодаря этому исключено попадание абразивных частиц в сопряжение и, соответственно, исключен абразивный износ. Нет необходимости в смазке такого сопряжения, и резко уменьшается уровень шума при работе механизма.

Выбор наиболее оптимальной схемы машины. К числу конструктивных способов относится и выбор наиболее оптимальной принципиальной схемы машины (механизма) с учетом повы-

шения износостойкости деталей. Конструкторская практика показывает, что, выбирая принципиальную схему, необходимо:

- предпочитать обратную пару трения прямой паре трения [6];
- рационально организовывать смазку трибосопряжений;
- обеспечивать возможность регулирования зазоров в трибосопряжениях;
- предусматривать возможность оперативной замены быстроизнашивающихся деталей;
- по возможности увеличивать толщину деталей в запас на износ;
- учитывать возможные температурные деформации деталей узлов трения и этим самым исключать возможность схватывания и заедания деталей в трибосопряжении.

Выбор материалов для трибосопряжений. Не рекомендуется сочетать в трибосопряжении мягкий материал с мягким и одноименные по природе материалы. Наоборот, рекомендуется сочетать твердый материал с мягким. Если реализовать такую пару трения невозможно, то отдавать предпочтение сочетанию твердого материала с твердым, но в этом случае приработку (обкатку) узла трения проводить на облегченном по нагрузке режиме. Целесообразно применять, где это возможно, полимеры и металлокерамику. Это будет снижать расход дефицитных материалов, массу деталей и понижать вибрацию и уровень шума при работе машины.

Замена трения скольжения трением качением. Потери энергии в условиях трения скольжения значительно выше, чем при реализации трения качения. Поэтому необходимо там, где это возможно, использовать в конструкции узлов трения подшипники качения, которые по сравнению с подшипником скольжения имеют следующие преимущества:

- меньшие моменты трения при пуске;
- меньшие осевые габаритные размеры;
- простота обслуживания и малый расход смазочного материала;
- полная взаимозаменяемость;
- малая стоимость в связи с массовым производством;
- меньший расход цветных металлов.

Использование принципа податливости. Податливость детали, общая или местная, позволяет ее рабочей поверхности следовать за деформацией сопряженной детали и приспособляться к неточностям ее геометрической формы. Самоустанавливающийся опорный подшипник является простейшим примером конструкции, имеющей деталь свободной податливости в виде вкладыша, обладающего угловой подвижностью. Полнее роль податливости проявляется в резиновых дейдвудных подшипниках, применяемых в судостроении, гидротурбостроении и в гуммированных деталях [32].

Гуммированные детали – это детали из композитных материалов, у которых подложка или арматура предназначены для создания необходимой жесткости и прочности, а также обеспечивают посадочные места в узле или присоединительные размеры. Резиновое покрытие или наполнитель из резины в межарматурном пространстве обеспечивают необходимую податливость рабочей поверхности детали.

Такие композитные детали хорошо сопротивляются гидроабразивному или газоабразивному износу, коррозии и эрозийным разрушениям. Их масса в несколько раз меньше чисто металлических, а применение в сборочных единицах уменьшает вибрацию в механизмах и снижает уровень производственного шума.

Технологически гуммированные детали могут быть получены методом формования в специальных пресс-формах с последующей вулканизацией. Используется также метод обкладки металлических поверхностей (или их обмазка гумсоставом из низкомолекулярных каучуков) с последующей вулканизацией в паровых котлах или вулканизацией на открытом воздухе (самовулканизация). Технология гуммирования выбирается чаще всего в зависимости от габаритов деталей и необходимой толщины резинового слоя.

В табл. 7.1 приводятся данные об относительной износостойкости эластичных материалов при изнашивании в гидроабразивном потоке, а в табл. 7.2 – в гидроабразивной массе. Из этих данных следует, что износостойкость резин на основе современных каучуков в 80...70 раз выше, чем стали или чугуна, принятых за эталон.

7.1. Относительная износостойкость резин при изнашивании в гидроабразивном потоке

Резина на основе каучука	Эластичность по отскоку	Температура стеклования, °С	Прочность при разрыве, МПа	Износостойкость резин относительно:	
				стали Ст3	чугуна СЧ21
СКД	0,52	-110	21,0	50	88
СКД+НК	0,50	-95	22,4	41	75
СКД+СКИ-3	0,50	-90	22,3	37	66
Наирит	0,42	-38	30,8	15	27
СКС-30-1	0,42	-75	34,6	13	23
СКС-30-АРКМ-15	0,42	-53	25,7	5	9
СКН-26-1	0,25	-42	32,0	2	4
СКН-40	0,23	-25	35,9	0,67	1,2
Сталь Ст3	–	–	–	1	1,7
Чугун СЧ21	–	–	–	0,56	1

Примечание. Скорость потока – 42 м/с; концентрация абразива – 300 г/л; диаметр абразивных частиц – 0,5...7 мм; время изнашивания – 60 мин.

7.2. Относительная износостойкость резин при изнашивании в гидроабразивной массе

Резина на основе каучука	Эластичность по отскоку	Прочность при разрыве, МПа	Удельный износ, мм ³ /см ²	Относительная износостойкость
СКУ-7(Л)	0,46	38,0	4,9	50
СКД-3	0,49	12,0	11,5	21
СКД+СКИ-3	0,48	13,8	17,5	14
СКС-30АРКМ-15	0,36	20,5	17,8	14
СКИ-3	0,40	20,2	25,3	9
Наирит «Б»	0,40	20,6	34,6	7
Чугун КЧ 30-60	–	–	246,1	1

Примечание. Скорость скольжения – 0,43 м/с; время изнашивания – 1000 ч; диаметр абразивных частиц – 0,1...1,5 мм; концентрация абразива – 80...90 %.

На рис. 7.2 представлена структурная схема классификации гуммированных деталей. Эта схема позволяет судить о возможных

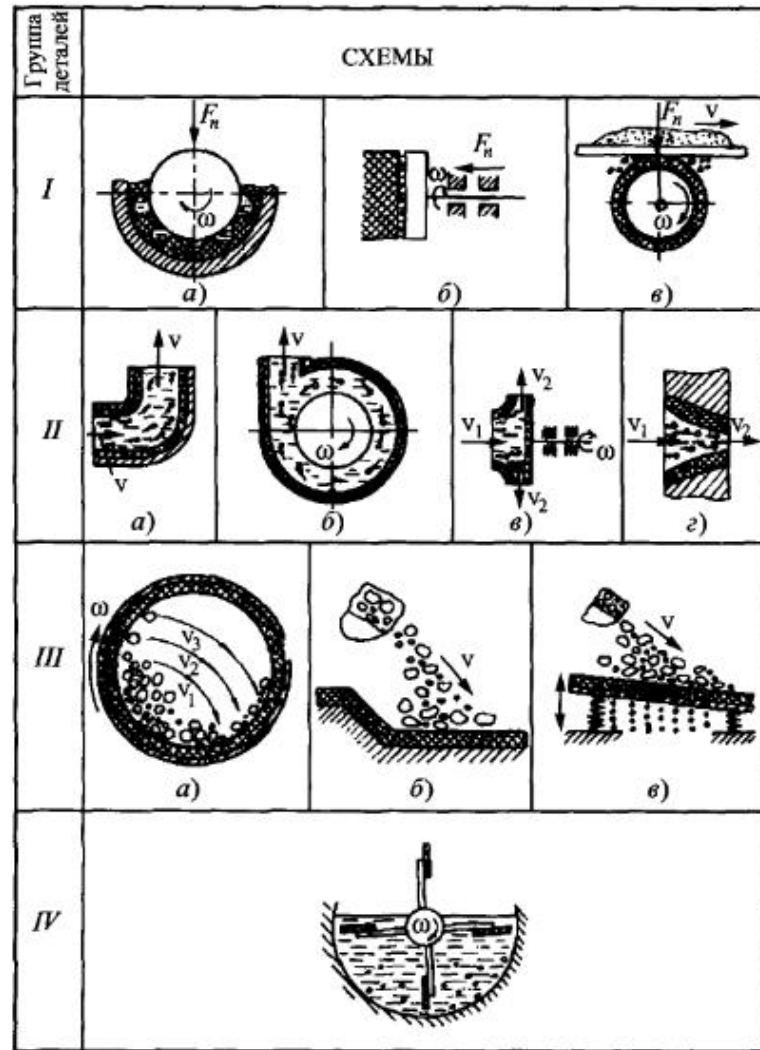


Рис. 7.2. Структурная схема классификации гуммированных деталей

областях применения гуммированных деталей. Так, деталям I-й группы присуще воздействие абразивной прослойки, деталям II-й группы – воздействие струи абразива, детали III-й группы могут противостоять лавинообразному удару абразива, а группы IV – способны успешно работать в массе абразива.

На рис. 7.3 представлены зависимости влияния различных факторов (толщины резинового слоя, скорости соударения, консистенции, крупности абразивных частиц, угла атаки и основных физико-механических свойств резины) на интенсивность изнашивания резин в гидроабразивном и газоабразивном потоке.

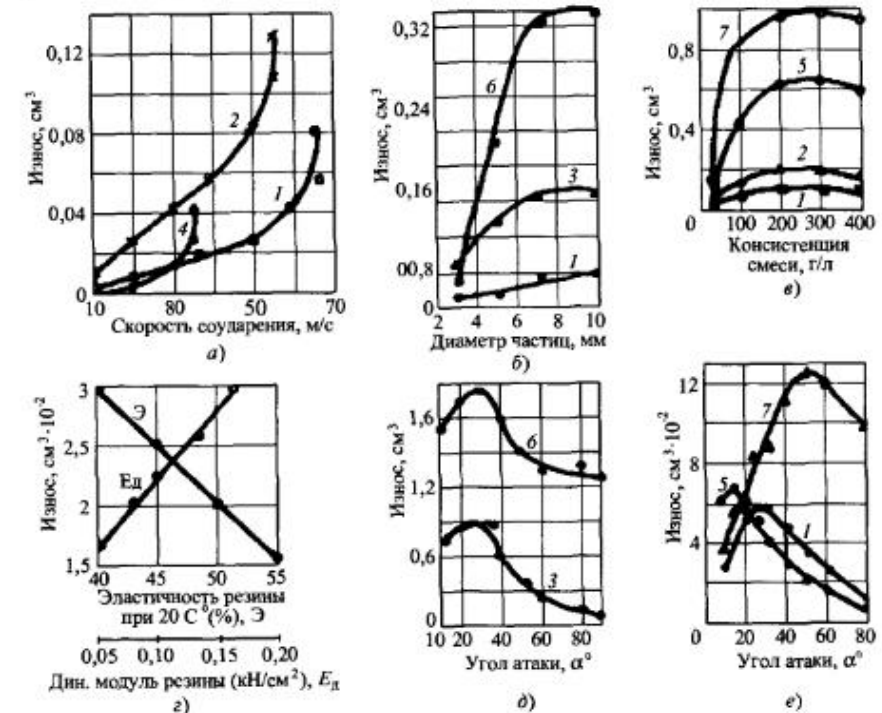


Рис. 7.3. Влияние различных факторов на износ резин при гидроабразивном (а-д) и газоабразивном (е) изнашивании:

- 1 – резина из СКД+СКИ-3; 2 – резина из наирита; 3 – резина из СКС-30А; 4 – резина из НК+СКБ; 5 – резина НК; 6 – резина из СКН-40; 7 – сталь Ст3

На рис. 7.2 представлена структурная схема классификации гуммированных деталей. Эта схема позволяет судить о возможных

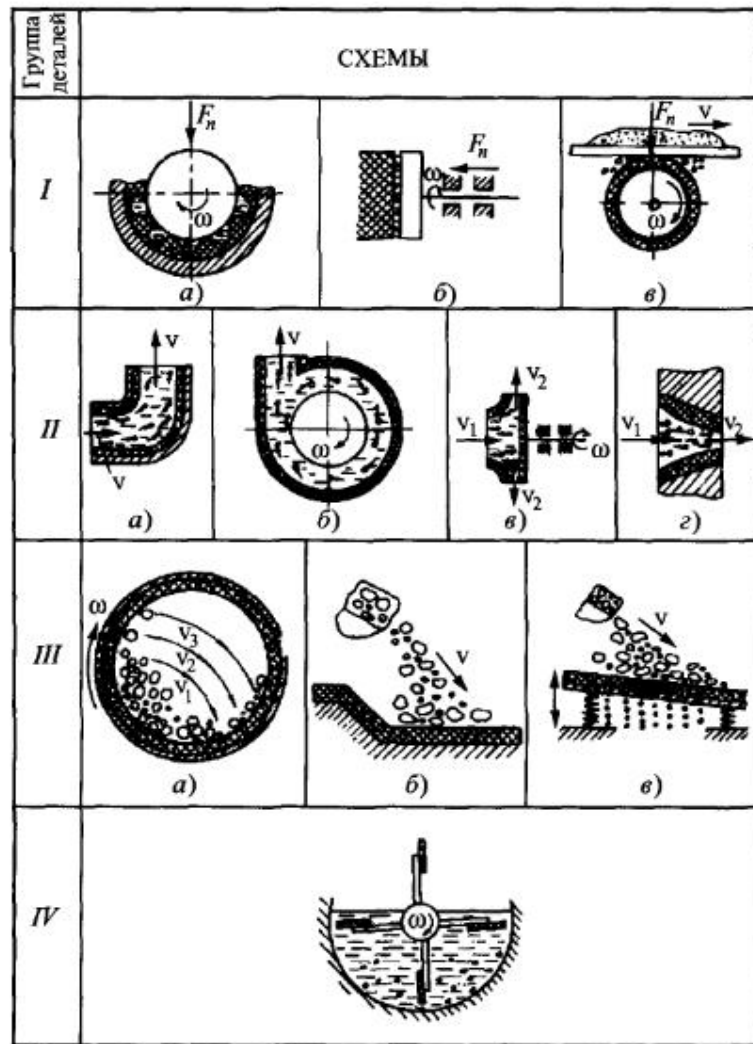


Рис. 7.2. Структурная схема классификации гуммированных деталей

областях применения гуммированных деталей. Так, деталям I-й группы присуще воздействие абразивной прослойки, деталям II-й группы – воздействие струи абразива, детали III-й группы могут противостоять лавинообразному удару абразива, а группы IV – способны успешно работать в массе абразива.

На рис. 7.3 представлены зависимости влияния различных факторов (толщины резинового слоя, скорости соударения, консистенции, крупности абразивных частиц, угла атаки и основных физико-механических свойств резины) на интенсивность изнашивания резин в гидроабразивном и газоабразивном потоке.

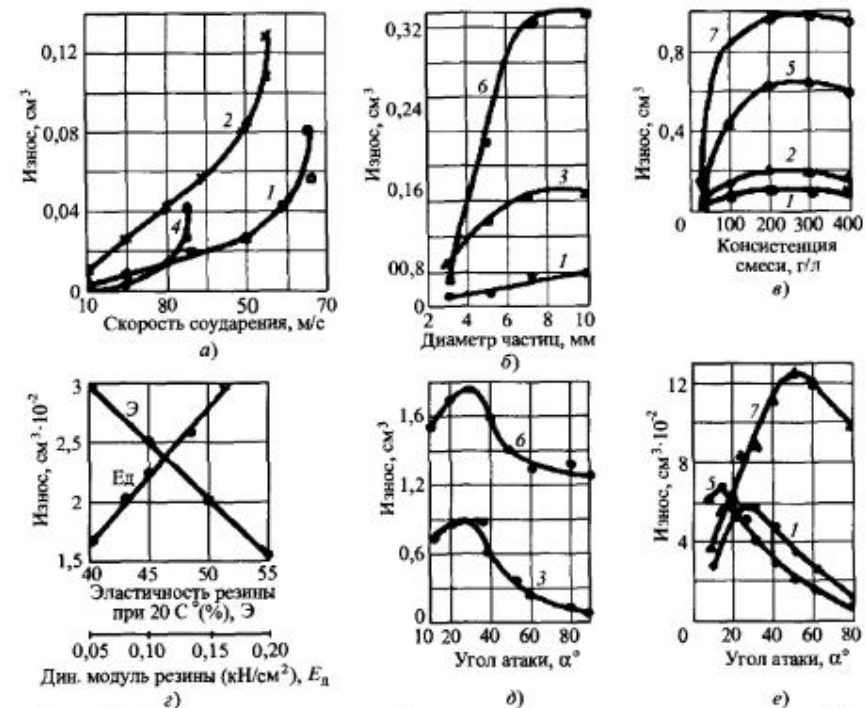


Рис. 7.3. Влияние различных факторов на износ резин при гидроабразивном (а-д) и газоабразивном (е) изнашивании:

1 – резина из СКД+СКИ-3; 2 – резина из наирита; 3 – резина из СКС-30А; 4 – резина из НК+СКБ; 5 – резина НК; 6 – резина из СКН-40; 7 – сталь Ст3

Анализ полученных зависимостей и механизмов изнашивания резин в струе твердых частиц и жидкости показывает, что при скоростях ниже критических интенсивность износа резин можно выразить в энергетической форме как произведение удельной интенсивности изнашивания на плотность поглощенной энергии при ударе

$$I_w = i_w e_n, \quad (7.1)$$

Критерием применимости этого уравнения является условие $v_0 \leq v_{кр}$, где v_0 – скорость частицы при ударе; $v_{кр}$ – критическая скорость, при которой наступает квазихрупкий механизм разрушения поверхности резины.

Плотность поглощенной энергии при ударе частицы

$$e_n = \gamma W_k / V_d, \quad (7.2)$$

где γ – коэффициент механических потерь при ударе; W_k – кинетическая энергия частиц при ударе; V_d – деформированный объем материала при ударе.

Удельный энергетический износ может быть представлен в следующем виде:

$$i_w = \Delta V_1 / \omega_1, \quad (7.3)$$

где ΔV_1 – объем материала, удаленный в среднем за одно нарушение фрикционной связи; ω_1 – работа, затраченная на отделение этого объема материала.

Выражая параметры, входящие в уравнение (7.3) через характеристики контактирующих поверхностей и число воздействий, получим

$$i_w = \frac{k' f' p_r^{t-1}}{(\psi + 1) \sigma_0'}, \quad (7.4)$$

где k – коэффициент напряженного состояния материала; f – коэффициент трения; t – коэффициент усталости; p_r – фактическое давление; ψ – коэффициент, характеризующий округленность абразивных частиц; σ_0 – прочность резины при однократном нагружении.

Решая уравнение (7.1) относительно кинетической энергии потока частиц и определяя коэффициент механических потерь в резине через параметры удара и свойства резин, получим уравнение интенсивности износа резин:

– при ударе без скольжения

$$I_w = \frac{\tau R^2 \rho_1^{0.6} E_d^{0.4} v_0^{2.2} \sigma' N (1 - \varepsilon \sin^2 \alpha - (5/7) \cos^2 \alpha)}{(1 + \psi) p_r \sigma_0' \sin^{0.8} \alpha (1 - \mu_2^2)^{0.4}}; \quad (7.5)$$

– при ударе со скольжением

$$I_w = \frac{\tau R^2 \rho_1^{0.6} E_d^{0.4} v_0^{2.2} N \sigma'}{(\psi + 1) p_r \sigma_0'} \times \left[\frac{1 - \cos^2 \alpha + f(1 + \sqrt{\varepsilon}) \sin^2 \alpha - \varepsilon \sin^2 \alpha - 3.5 f^2 (1 + \sqrt{\varepsilon})^2 \sin^2 \alpha}{(1 - \mu_2^2) \sin^{0.8} \alpha} \right], \quad (7.6)$$

где τ – время испытаний; R – радиус частицы; ρ_1 – плотность резины; E_d – динамический модуль упругости резины; f – коэффициент трения; v_0 – скорость частицы; N – число ударов (число частиц); ε – эластичность резины; μ_2 – коэффициент Пуассона.

Эти уравнения позволяют проанализировать влияние различных факторов на интенсивность износа. Наибольшее влияние на интенсивность износа резин оказывают эластичность ε и коэффициент трения f . Увеличение коэффициента трения и уменьшение эластичности резины в значительной степени интенсифицирует износ, что согласуется с результатами испытаний конкретных деталей машин, в частности, футеровки шаровых мельниц и спиральных классификаторов [7].

На рис. 7.4 представлена гуммированная спираль классификатора КС-24 диаметром 2400 мм и длиной 12,5 м. Испытания такого спирального классификатора в условиях обогатительной фабрики компании «Норильский никель» показали, что срок службы резиновой футеровки в 3 раза превысил срок службы футеровки из высоколегированного чугуна ИЧХ28Н2.

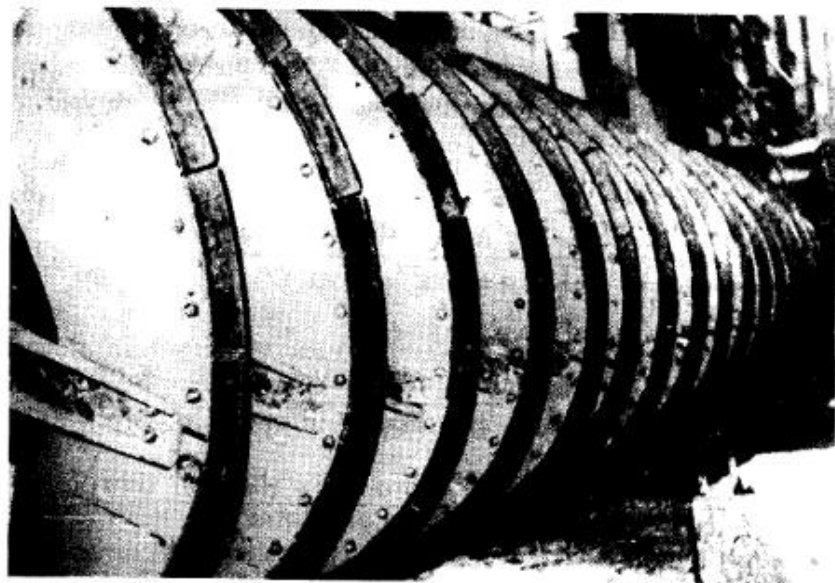


Рис. 7.4. Гуммированная спираль классификатора КС-24

О преимуществах резины как конструкционного материала наглядно свидетельствует вид металлического и гуммированного диска бисерной мельницы, показанного на рис. 7.5. Оба диска эксплуатировались в одинаковых условиях и отработали 3 месяца, однако за указанный срок диск из металла практически полностью изнашился, а гуммированный сохранил исходную форму.

Улучшение условий трения. Конструктивные возможности улучшения условий трения деталей весьма разнообразны и их систематизация наиболее целесообразна по направленности конструктивных решений: снижение контактной нагруженности; уменьшение работы трения; устранение возможности схватывания; улучшение температурного режима трения; защита трибосопрежений от попадания твердых частиц; изоляция трибосопрежений от химических агентов внешней среды и др.

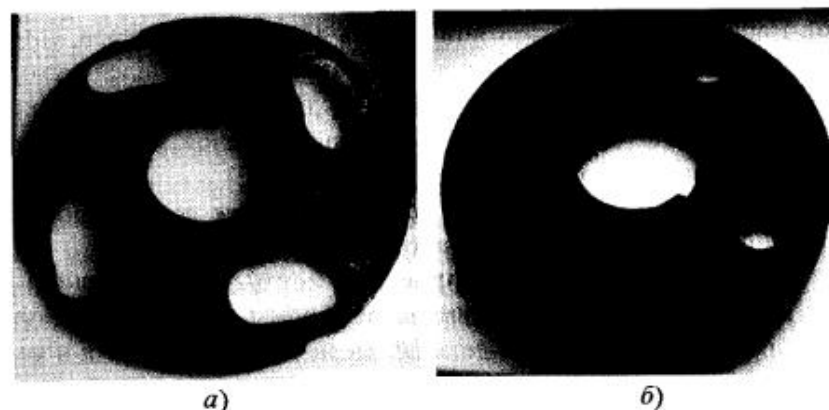


Рис. 7.5. Металлический (а) и гуммированный (б) диск бисерной мельницы

При поиске рациональных конструктивных решений в каждом частном случае необходимо во избежание негативных последствий и удорожания конструкции выявить минимум требований к условиям трения, достаточных для достижения заданного ресурса деталей.

Для правильного решения этой задачи нужно знать закономерности изнашивания и влияние на интенсивность изнашивания тех или иных факторов, определяющих условия трения и не поддающихся регулированию конструктивными средствами.

Равностойкость изнашивающихся деталей. Неравномерность изнашивания, сосредоточение наибольших мест износа на каком-либо участке изнашиваемой поверхности, повышенная скорость изнашивания одной из деталей трибосопрежения приводят обычно к преждевременной потере работоспособности всего агрегата при неполном использовании ресурса остальных деталей.

В качестве примера неравномерного изнашивания профиля можно привести затупление лезвий различных режущих инструментов. Устранить такой недостаток можно конструктивно-технологическими приемами, обеспечивающими определенную степень равномерности профиля лезвия, т. е. его самозатачиванием

[36]. Например, эффект самозатачивания для ножей куттеров, широко применяемых в мясоперерабатывающей промышленности, может быть получен при использовании двухслойного ножа при соотношении твердости более износостойкого слоя к твердости менее износостойкого слоя в пределах 18...22 [22].

Долговечность таких ножей в 6–12 раз выше долговечности однослойных ножей обычной конструкции.

Самоорганизация геометрической формы при изнашивании деталей. Изыскание оптимальной формы занимает важное место при конструировании деталей. Первоначальная форма и ее изменения в процессе изнашивания влияют на работоспособность деталей. В то же время темп износа отдельных деталей после приобретения ими формы естественного износа замедляется многократно. Впервые это заметили спортсмены, которые спортивную обувь с прямым каблуком и носком заменили на закругленную. Сообщив ей форму естественного износа, они получили ряд положительных результатов, в том числе износостойкость такой обуви в несколько раз увеличилась. Кроме того, такая форма оказывала положительное влияние на осанку спортсмена и его выносливость.

Такой же эффект по износостойкости был получен у цилиндрических и конических зубчатых колес путем обработки концов зубьев и придания им бочкообразной формы. Бочкообразная форма зуба не только способствует увеличению долговечности передачи, но и уменьшает шум во время работы.

Избирательный перенос. Другой формой самоорганизации в узлах трения является избирательный перенос. Это явление было обнаружено в парах трения сталь–бронза при использовании глицериновой смазки, а также в паре сталь–сталь в узлах трения компрессора домашнего холодильника при смазывании маслофреоновой смесью. Исследования Д.Н. Гаркунова [6] и практика показывают, что медная пленка в паре бронза–сталь образуется в результате анодного растворения бронзы глицерином. Глицерин действует при трении как слабая кислота. Атомы легирующих элементов бронзы (олово, цинк, железо и др.) уносятся в смазочный материал, в результате поверхность бронзы обогащается атомами

меди. В то же время стальная поверхность также покрывается тонким слоем меди. После того как медная пленка покроет бронзовую и стальную поверхности, молекулы глицерина уже не могут взаимодействовать с бронзой («вытягивать» атомы легирующих элементов), процесс растворения бронзы прекращается и наступает установившийся режим избирательного переноса. В этих условиях медная пленка, ее называют сервовидной (лат. – «спасать жизнь»), как мягкий материал работает по мягкому. Нагрузка в этом случае распределяется равномерно по поверхности трения и имеет небольшую величину на единице площади, что способствует резкому снижению интенсивности изнашивания трибосопряжения и, в целом, повышению ресурса узла трения.

7.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ

Не менее важное значение в повышении износостойкости деталей машин имеют технологические способы [41]. В основе этих способов лежит создание фрикционных поверхностей деталей с заданными свойствами, которые уменьшали бы склонность к схватыванию и износу.

Правильный выбор вида обработки и шероховатости поверхности. Независимо от исходной шероховатости, которая может меняться в широких пределах, к концу приработки устанавливается для каждой пары трения своя определенная шероховатость, сохраняющаяся в течение длительного времени. В качестве примера в табл. 7.3 представлена шероховатость поверхностей отдельных деталей.

7.3. Шероховатость приработанных поверхностей

Поверхность	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм
Подшипник скольжения	0,15
Диски и колодки самолетного тормоза	0,78
Зубья шестерен	0,7...0,8

Если бы удалось обработать поверхность таким образом, чтобы исходная шероховатость соответствовала равновесной, то исчезла бы необходимость в периоде приработки деталей (см. кривую Лоренца). Однако добиться этого чрезвычайно сложно. Поэтому следует назначать такую финишную операцию, которая бы обеспечила окончательную шероховатость как можно ближе к равновесной. Чрезмерно чистые поверхности и чрезмерно грубые отрицательно влияют на износостойкость. Грубошероховатые поверхности контактируют по малым площадкам, что приводит к высоким фактическим давлениям и, следовательно, к большому износу. Гладкие поверхности склонны к заеданию, они хуже адсорбируют смазку.

Большое значение имеет направление следов обработки, которое не влияет на фрикционные свойства только при жидкостном трении, когда шероховатые поверхности разделены слоем смазки. При граничном трении мелкошероховатых поверхностей наименьший износ обеспечивается направлением следов обработки, перпендикулярным движению (устраняется схватывание), а при трении грубошероховатых поверхностей – параллельным движению.

Кроме шероховатости, на поверхности трения всегда имеется волнистость. Влияние волнистости на свойства поверхности неоднозначно. Волнистость приводит к изменению характера контакта. Вместо плоских поверхностей контактируют криволинейные. Поэтому несмазанные волнистые поверхности более склонны к схватыванию (адгезионному износу), чем плоские. В то же время волнистые поверхности лучше удерживают смазку во впадинах между волнами и работают лучше плоских.

Химико-термическая обработка (ХТО). Основное назначение ХТО – создание на стальной поверхности тонкого легированного слоя вследствие диффузии легирующих элементов. Затем поверхность подвергается закалке. В результате этого поверхностный слой детали приобретает высокую твердость (до 60 HRC). Для этого применяется цементирование, азотирование, борирование, насыщение хромом, никелем и двумя, тремя элементами одновременно. Толщина упрочненного слоя может превышать 2 мм. На-

более широко осуществляется цементация в твердом, жидком и газообразном карбюризаторах при температуре 950...980 °С. Азотированию подвергаются детали при более низкой, чем при цементации, температуре 520...560 °С. Легирующие элементы (Cr, Mo, Al), входящие в состав стали, образуют с азотом стойкие нитриды, обладающие высокой твердостью и износостойкостью.

Поверхностная закалка. В самостоятельном виде поверхностная закалка применяется для образования твердого износостойкого слоя на поверхности деталей из средне- и высокоуглеродистых сталей. Ей предшествует объемная термообработка: нормализация или объемная закалка и высокий отпуск. Она состоит из двух операций: нагрева поверхностного слоя и быстрого его охлаждения. Нагрев осуществляется высокочастотным методом, контактным, плазменным, лазерным и нагревом в электролите. Наиболее распространенными и эффективными являются высокочастотный и контактный методы нагрева. Источниками нагрева для высокочастотного метода служат генераторы высокой частоты. Эти генераторы предназначены для получения в катушке электромагнитного поля, а в детали вихревых токов (токов Фуко), которые проходят лишь в тонком поверхностном слое, где и выделяется вся образующая теплота. Нагретая таким образом поверхность детали затем резко охлаждается потоком воды.

Электроконтактный нагрев осуществляется путем пропуска переменного тока через контакт детали с электродом в виде катящегося по поверхности детали ролика. Источником тока является обычно однофазный сварочный трансформатор. В завершении нагретая поверхность охлаждается струей воды.

Плазменные методы предусматривают нагрев поверхности детали обычными газовыми горелками (газовая среда – смесь кислорода с ацетиленом) или при помощи плазмотрона – устройства, генерирующего струю плазмы. В качестве источника плазмы используют аргон.

Лазерное излучение в инфракрасном диапазоне, сфокусированное в пятно диаметром порядка десятка микрометров, совершает сканированное движение по поверхности детали. Это обеспечивает закалку поверхностного слоя, глубина которого регулируется

за счет изменения скорости сканирования специальными механическими устройствами. Лазерная закалка обеспечивает получение однородной мелкокристаллической поверхностной структуры, обладающей повышенной твердостью и износостойкостью. После термообработки лазерным лучом не происходит коробление элементов детали, не наблюдается заметного ухудшения качества поверхности. Из-за высокой стоимости процесса лазерной закалке подвергаются самые дорогостоящие и ответственные детали, такие, например, как коленвалы ДВС и др.

Электрохимические покрытия. Их наносят на поверхности деталей методом электролиза. Чаще всего применяются электрохимическое хромирование, серебрение, нанесение покрытия из олова, свинца, цинка, индия и др. Одно из главных мест занимает гладкое или пористое хромирование, которое хорошо удерживает смазку и обладает высоким сопротивлением износу в условиях граничного трения.

В технике для 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. Чаще всего для этих целей используются оловянные и олово-свинцовые покрытия.

Наплавка износостойких слоев. Это один из наиболее распространенных способов восстановления изношенных деталей. Все известные виды наплавки имеют общие металлургические и физико-химические основы. К ним относятся: расплавление наносимого металла с частичным расплавлением поверхностного слоя детали, перемешивание расплавов, кристаллизация.

Наибольшее распространение получила электродуговая наплавка (ручная, полуавтоматическая), наплавка под слоем флюса и плазменно-дуговая. Наилучшие результаты получаются тогда, когда удастся исключить контакт наплавленного металла с кислородом воздуха. Для этого процесс проводят в среде углекислого газа, аргона и их смесей.

Высокоэффективным методом наплавки является наплавка порошковой проволокой [43].

Напыление покрытий из порошковых материалов. Если в высокотемпературную струю газа подать частицы порошка, то при столкновении с поверхностью они деформируются и прочно сцепляются с деталью. Существует две разновидности такой технологии: газоплазменное напыление и напыление с помощью электрической дуги или индукционных токов высокой частоты [4].

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 и т.п. Напыление широко применяется для восстановления формы изношенных деталей.

Плакирование. Этот метод применяется при изготовлении деталей или восстановлении их формы после изнашивания. Толщина наносимого слоя может составлять несколько миллиметров.

Толстослойные покрытия часто наносят методом прокатки. Сцепление слоев осуществляется за счет диффузии при высокой температуре. Таким методом получают биметаллические полосы, кольца и др. [4].

Механическое упрочнение поверхностей – один из простых и наиболее экономичных способов упрочнения деталей машин. Здесь используется явление значительного роста предела текучести и, соответственно, твердости материала, при высокой степени пластической деформации. Этот метод часто называют деформационным упрочнением. Он основан на использовании в качестве деформирующих тел роликов, шариков, струи из мелких стальных или стеклянных шариков, а также сферических алмазных наконечников. Помимо упрочнения, поверхность деталей выглаживается, снижается их шероховатость. Вершины выступов становятся более пологими, и контакт переходит из пластического в упругое состояние. Все это существенно повышает усталостную износостойкость и прочность деталей, снижает срок их приработки.

При $\tau_{об} = \text{const}$ износ деталей при любой наработке $\tau < T$, определяется как

$$U = b\tau_{об}^{\alpha-1}\tau,$$

а при $\tau = T$ предельный износ

$$U_n = b\tau_{об}^{\alpha-1}T.$$

Другими словами, благодаря применению нескольких периодов технического обслуживания ($\tau_{об 1}, \tau_{об 2}, \dots, \tau_{об i}$), ресурс эксплуатации машины можно в несколько раз увеличить при том же предельном износе U_n . Этот метод широко применяется на практике.

7.4. РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ И МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Теоретические основы расчета на износ трибосопряжений были созданы в нашей стране М.М. Хрущовым, И.В. Крагельским, Ю.Н. Дроздовым, А.С. Прониковым, Д.Н. Решетовым и др. В качестве основы такого расчета принимается понятие безразмерной величины интенсивности изнашивания материала в виде [25]:

$$I = \frac{dh}{dl} = \frac{dV}{A_a dl} = \frac{dG}{\rho A_a dl} = \tau_a \frac{dV}{d\omega}, \quad (7.7)$$

или, принимая усредненные значения величин при стационарном режиме изнашивания, выражение для интенсивности изнашивания принимает вид:

$$I = \frac{h}{l} = \frac{V}{A_a l} = \frac{G}{\rho A_a l} = \tau_a \frac{V}{\omega}, \quad (7.8)$$

где h , V , G – величины линейного, объемного и весового износа материала соответственно; l – путь трения; A_a – номинальная площадь касания; $\tau_a = F_{тр}/A_a$ – удельная сила трения на контакте между сопряженными телами; $F_{тр}$ – сила трения; $\omega = F_{тр}l$ – работа силы трения; ρ – плотность изнашиваемого материала.

Зубчатые передачи. Расчет зубчатых колес на контактную выносливость является основным при проектировании зубчатых передач [5]. На основании таких расчетов устанавливают геометрические размеры для зубчатых передач, считая, что недостаточ-

ная контактная прочность может привести к выкрашиванию (питингу) поверхности зубьев. В то же время практика показывает, что зубчатые передачи горных, дорожных, транспортных, строительных, металлургических и других машин, а также различных космических и энергетических объектов, как правило, не выкрашиваются, а изнашиваются. Поэтому проверка зубчатых передач на долговечность по критерию износостойкости является крайне необходимой [27].

В качестве количественной оценки процесса изнашивания зубьев принимают износ h , допускаемое значение которого $[h]$ ограничивается в зависимости от требований к зубчатой передаче, кинематической точности, уровню шума, динамическим нагрузкам, прочности, толщине упроченного слоя и т.д. Правильный выбор конструктором значения $[h]$ обеспечивает оптимальную долговечность зубчатой передачи без снижения ее эксплуатационных характеристик.

Опыт эксплуатации зубчатых передач показывает, что в зависимости от нагруженности передач существует два характерных вида геометрии изношенных зубьев (рис. 7.7).

Наиболее типичный вид износа тяжело нагруженных зубчатых передач с модулем $m > 1,5$ мм представлен на рис. 7.7, а. Особенностью этого вида износа является увеличение количества изношенного материала от полюсной линии к периферии зубьев, особенно к ножке зубьев, т. е. к месту повышенного скольжения. Другой случай (рис. 7.7, б) отличается более равномерным износом профиля зубьев и относится к малонагруженным зубчатым парам приборного типа с модулем $m < 1,5$ мм.

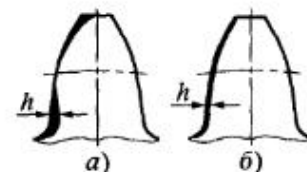


Рис. 7.7. Вид изношенных зубьев:
а – тяжело нагруженных передач;
б – малонагруженных передач

Наибольшая толщина изношенного слоя зуба для тяжелонагруженной передачи определяется по выражению

$$h_{1,2} = 2,25 \cdot 60 I_{h1,2} \sqrt{W_{H1,2} \eta \rho_{np}} \frac{v_{s1,2}}{v_{k1,2}} n_{1,2} c L_{1,2} \leq [h]_{1,2}, \quad (7.9)$$

где $I_{h1,2}$ – интенсивность изнашивания материалов шестерни 1 и колеса 2; $W_{H1,2}$ – удельная расчетная нагрузка; η – упругая постоянная; ρ_{np} – приведенный радиус кривизны в расчетной точке зуба; $v_{s1,2}$ – скорость скольжения в расчетных точках профиля зуба; $v_{k1,2}$ – скорость перемещения общей точки (качения) по профилю зуба; $n_{1,2}$ – частота вращения шестерни и колеса; c – число колес, находящихся в зацеплении (для однопарного зацепления $c = 1$); $L_{1,2}$ – ресурс работы зацепления по износу (долговечность); $[h]_{1,2}$ – расчетное значение допустимого износа.

Расчетное значение допустимого износа $[h]_{1,2}$ назначается с учетом табличного допустимого износа $[h]_{1,2}^*$, состояния трущихся поверхностей и функционального назначения зубчатой передачи

$$[h]_{1,2} = K_{\phi} [h]_{1,2}^*, \quad (7.10)$$

где $K_{\phi} = 0,5 \dots 1,0$ – коэффициент, который учитывает уровень надежности, экологичности и безопасности работы передачи (для приводов общего назначения можно принимать $K_{\phi} \approx 0,9$).

Табличное значение допустимого износа ориентировочно можно принять в зависимости от вида упрочнения зубьев:

- закалка ТВЧ ($HRC \leq 50$) $[h]_{1,2}^* = 0,8$ мм;
- улучшение (HB 250...300) $[h]_{1,2}^* = 0,5$ мм;
- цементация ($HRC > 50$) $[h]_{1,2}^* = 1,2$ мм;
- обдувка дробью $[h]_{1,2}^* = 1,5$ мм;
- азотирование $[h]_{1,2}^* = 0,45 \dots 0,5$ мм.

Для других видов упрочнения значения $[h]_{1,2}^*$ можно получить в справочной литературе по машиностроению [43].

Удельная расчетная нагрузка (Н/мм) находится по выражению

$$W_{H1,2} = \frac{2T_{1,2} K_{H\alpha} K_{H\beta} K_{H\nu}}{b d_{1,2} \varepsilon \cos \alpha}, \quad (7.11)$$

где $T_{1,2}$ – крутящий момент на шестерне 1 и колесе 2, Н·мм; $K_{H\alpha}$ – коэффициент, учитывающий распределение нагрузки между зубьями ($K_{H\alpha} = 1 \dots 1,2$); $K_{H\beta}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по длине контактной линии ($K_{H\beta} = 1 \dots 1,6$); $K_{H\nu}$ – динамический коэффициент ($K_{H\nu} = 1 \dots 1,5$ для прямозубых колес и $K_{H\nu} = 1 \dots 1,2$ для косозубых колес); b – ширина колес, мм; $\varepsilon \approx 1,2$ – коэффициент торцового перекрытия; $\alpha = 20^\circ$ – угол зацепления; m – модуль зацепления; $d_{1,2} = d_{w1,2} - 2(0,3h')$ – расчетный диаметр шестерни 1 или колеса 2 для наиболее изношенного места на ножках зуба (где $d_{w1,2}$ – диаметры начальных окружностей; $h' = 1,25m$ – высота ножки зуба), мм.

Упругая постоянная находится по формуле:

$$\eta = \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \mu_2^2)}{E_2} \right], \quad (7.12)$$

где для стальных колес коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, а модуль упругости $E_1 = E_2 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Приведенный радиус кривизны

$$\rho_{np} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}, \quad \text{где } \rho_1 = \frac{d_1 \sin \alpha}{2}; \quad \rho_2 = \frac{d_2 \sin \alpha}{2}. \quad (7.13)$$

Приближенные значения скоростей $v_{k1,2}$ и $v_{s1,2}$ определяются по выражениям:

$$v_{k1} = \omega_1 d_{w1} / 2; \quad v_{k2} = \omega_2 d_{w2} / 2; \quad (7.14)$$

$$v_{s1,2} = (\omega_1 - \omega_2) K P_{1,2}, \quad (7.15)$$

где $\omega_{1,2} = \pi n_{1,2} / 30$ – угловые скорости шестерни 1 и колеса 2; $K P_{1,2}$ – радиус мгновенного вращения.

Ориентировочно можно принять:

– для шестерни $KP_1 = d_1 \sin \alpha / 2$;

– для колеса $KP_2 = d_2 \sin \alpha / 2$.

Более точные значения $v_{k1,2}$ и $v_{s1,2}$ можно получить в расчетных точках по диаграммам скольжения зубчатого зацепления, используя методику, рассматриваемую в курсе ТММ.

Основная трудность расчета на износ заключается в правильном определении $I_{h1,2}$, так как интенсивность изнашивания зависит от типа применяемого масла, метода смазывания зубьев, физико-механических характеристик материалов зубчатых колес, характеристик контактирующих поверхностей (физических, химических, механических, геометрических) и других факторов.

С использованием теории подобия и моделирования трибологических процессов Ю.Н. Дроздов рекомендует интенсивность изнашивания зубьев закрытых и хорошо смазывающихся жидкой смазкой передач определять на основе экспериментально-теоретических исследований по уравнению [20]:

$$I_h = k \left(\frac{\sigma_H}{HB} \right)^{m_1} \left(\frac{h_{cm}}{\chi} \right)^{m_2} \left(\frac{RT}{Q} \right)^{m_3} \left(\frac{\eta_{100}}{\eta_p} \right)^{m_4}, \quad (7.16)$$

где k – коэффициент, учитывающий физико-химические свойства контакта.

В зависимости от типа смазки этот коэффициент определяется на основании экспериментальных данных, приведенных в табл. 7.2.

Критерий $\left(\frac{\sigma_H}{HB} \right)$ – это безразмерный комплекс, характеризующий напряженное состояние контакта и площадь фактического касания тел, где σ_H – контактное напряжение, HB – твердость материала по Бринеллю в МПа.

Контактное напряжение может быть определено для зубчатых передач по известной формуле из курса деталей машин:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\epsilon \sqrt{\frac{2T_1 K_H (u \pm 1)}{d_1^2 b_\omega u}}, \quad (7.17)$$

где $Z_E = \sqrt{\frac{E_{np}}{\pi(1-\mu^2)}}$ – коэффициент, учитывающий влияние механических свойств материалов зубчатых колес (для стальных колес

коэффициент Пуансона $\mu = 0,3$, $E_{np} = 2,1 \cdot 10^5$ МПа); Z_H – коэффициент, учитывающий форму соприкасающихся поверхностей зубьев (для прямозубых колес $Z_H = \sqrt{2/\sin 2\alpha}$, косозубых – $Z_H = \sqrt{2 \cos^2 \beta / \sin 2\alpha}$); Z_ϵ – коэффициент, учитывающий влияние торцевого перекрытия (для прямозубых колес $Z_\epsilon = \sqrt{(4-\epsilon)/3}$, косозубых – $Z_\epsilon = \sqrt{1/3}$); $K_H \approx 1,3$ – коэффициент нагрузки; T_1 – момент крутящий на шестерне; d_1 – диаметр делительной окружности шестерни; b_ω – рабочая ширина зубчатого венца; u – передаточное число.

Критерий $\left(\frac{h_{cm}}{\chi} \right)$ – это комплекс, учитывающий толщину смазочного слоя и шероховатость рабочих поверхностей зубьев,

где χ – приведенный параметр шероховатости поверхности; h_{cm} – толщина смазочного слоя.

Эти параметры могут быть определены по формулам:

$$\chi = \sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2},$$

где Ra_1 и Ra_2 – среднеарифметическое отклонение шероховатостей поверхностей зубьев шестерни и колеса (можно принять $Ra_1 = Ra_2 = 1 \dots 1,25$ мкм);

$$h_{cm} = h_{rp} + h_{к.г.},$$

где $h_{rp} \leq 0,1$ мкм – максимальная толщина граничного слоя смазки; $h_{к.г.} \approx 0,1 \dots 2$ мкм – толщина смазочного слоя контактно-гидродинамической природы для закрытых зубчатых передач ($h_{cm} \approx 1,1$ мкм).

Критерий $\left(\frac{RT}{Q} \right)$ – это комплекс, характеризующий свойства

граничной смазки адсорбционной природы, где $R = 8,314$ Дж/моль·К – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура на контакте; $Q = 20 \dots 25$ кДж/моль – теплота адсорбции смазочного материала.

Критерий $\left(\frac{v_{100}}{v_p}\right)$ – это комплекс, характеризующий вязкост-

ные свойства масла, где v_{100} и v_p – соответственно кинематическая вязкость масла при 100 °С и рабочей температуре смазочного материала (~ 50 °С).

В указанном выше расчетном уравнении по результатам экспериментов зубчатых передач и роликовых образцов можно принять $m_1 \approx m_2 \approx m_3 = 1$ [20]. Значение коэффициента k и показателя степени m_4 представлены в табл. 7.4. Эксперименты показали повышенный износ зубчатых колес при смазывании синтетическим маслом № 1 по сравнению с нефтяными маслами. Использование специальных присадок уменьшает износ зубчатых колес (масла № 4, 5), а повышение температуры масла увеличивает (табл. 7.5). Увеличение нагрузки (контактных напряжений) приводит практически к пропорциональному росту износа.

7.4. Зависимость k и m_4 от типа смазочного материала

№ масла	Тип смазочного материала	$k \cdot 10^{-5}$	m_4
1	Синтетическое моторное масло с антиокислительной и противоизносной присадкой ($v_{100} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$)	1,02	1,5
2	Маловязкое нефтяное масло, содержащее антиокислительную, противопенную, противоизносную, противозадирную присадки ($v_{100} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$)	0,07	1
3	Нефтяное масло, содержащее многофункциональную, депрессорную, антипенную присадки ($v_{100} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$)	0,045	3

Продолжение табл. 7.4

№ масла	Тип смазочного материала	$k \cdot 10^{-5}$	m_4
4	Нефтяное масло, содержащее загущенную депрессорную, антиокислительную, противозадирную, антикоррозионную, антипенную присадки ($v_{100} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$)	0,009	1
5	Нефтяное масло, содержащее многофункциональную, депрессорную присадки ($v_{100} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$)	0,008	1
6	Нефтяное масло без присадок ($v_{100} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$)	0,059	2,5

7.5. Влияние температуры на вязкость масел общего назначения

Вязкость кинематическая, $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Марки масел для цилиндрических, конических и червячных зубчатых передач				
	ТЭп-15	ТСп-10	ТАп-15В	ТАп-15К	ТАД-17
v_{100}	15	10	15	15	17
v_{50}	140	65	140	105	120

В заключение определяется ресурс работы зубчатой передачи по износу (в часах) по формуле

$$L_{1,2} = \frac{[h]_{1,2} v_{k1,2}}{2,25 \cdot 60 \cdot I_{h1,2} n_{1,2} c v_{s1,2} \sqrt{W_{H1,2} \eta_{\text{пр}}}}, \quad (7.18)$$

и сравнивается с ресурсом зубчатой передачи по контактной прочности.

Шлицевые соединения. Шлицевым соединениям присуща высокая концентрация нагрузки, обусловленная погрешностями изготовления, смещениями осей деталей (погрешностями монтажа), смещениями и закручиванием деталей под нагрузкой. Все эти

погрешности приводят к изнашиванию зубьев и развитию фреттинг-коррозии. Поэтому при проектировании шлицевых соединений, кроме расчетов на прочность по напряжениям смятия, необходимо проводить и проверочный расчет по критерию износа.

Условный расчет на износостойкость соединений с эвольвентным профилем зубьев выполняют в форме определения допустимого угла перекоса.

Принимается, что если ось шлицевого вала в результате монтажа или под нагрузкой получила перекос на угол $\Delta\varphi$ по отношению к оси, охватывающей ступицы, то наибольшее взаимное смещение точек зубьев (шлицев) за один оборот составит

$$\Delta l = \Delta\varphi d_m \sqrt{1 + (l/d_m)^2}, \quad (7.19)$$

где l , d_m – соответственно длина и средний диаметр соединения, мм; $\Delta\varphi$ – угол перекоса, рад.

Скорость относительного скольжения, мм/с, определяется по формуле:

$$v_{ск} = \frac{\Delta\varphi n d_m}{60} \sqrt{1 + (l/d_m)^2}. \quad (7.20)$$

Удельная мощность трения:

$$P_1 = v_{ск} f \sigma_{см} = \frac{\Delta\varphi n d_m}{60} f \sigma_{см} \sqrt{1 + (l/d_m)^2} \leq [P_1], \quad (7.21)$$

где n – частота вращения вала, мин^{-1} ; f – коэффициент трения; $\sigma_{см}$ – среднее напряжение смятия в соединении при коэффициенте концентрации нагрузки $\psi = 1$; $[P_1]$ – допускаемая мощность трения, Н·мм/мм²с.

Опыт показывает, что в удовлетворительно работающих шлицевых соединениях при твердости поверхностей деталей свыше 50 HRC, углах перекоса $\Delta\varphi = 7'$ (0,002 рад) и граничной смазке допустимая мощность $[P_1] = 150$ Н·мм/мм²с, а при жидкостной смазке $[P_1] = 250$ Н·мм/мм²с.

Из выражения (7.14) допустимый угол перекоса в шлицевых соединениях по критерию износа:

$$[\Delta\varphi] \leq \frac{60[P_1]}{f \sigma_{см} n d_m \sqrt{1 + (l/d_m)^2}}. \quad (7.22)$$

Для шлицевых соединений приводов общего назначения можно принимать:

$[P_1] = 0,3$ HRC для соединений при граничной смазке (масляный туман);

$[P_1] = 0,5$ HRC для соединений при жидкостной смазке (облив).

Если в результате расчета затрачиваемая на трение мощность получается $P_1 \leq 0,1$ HRC при жидкостной смазке и $P_1 \leq 0,06$ HRC при граничной смазке, то изнашивания в соединениях практически нет при неограниченно большом числе циклов нагружения. Из этого следует, что допустимый угол перекоса $[\Delta\varphi]$ можно уменьшить за счет снижения напряжений смятия $\sigma_{см}$ или коэффициента трения f путем применения антифрикционных покрытий. Однако во всех случаях углы перекоса выше $10'$ нежелательны, а свыше $40'$ недопустимы.

Уплотнения манжетные применяют во всех видах транспортных машин сельскохозяйственной, дорожно-строительной и горной техники, в пищевом машиностроении, гидроприводах, редукторах и технике.

Конструкции резиновых манжетных уплотнений для валов, применяемых в технике, чрезвычайно разнообразны. Однако при проектировании устройств с резиновыми манжетными уплотнениями руководствуются следующим. Давление в зоне контакта (контактная нагрузка p_a) должна быть больше «напора» натекания уплотняемой среды.

Существует «критическая» контактная нагрузка, ниже которой уплотнитель не выполняет основной функции – герметизации, то есть должно выполняться условие

$$p_a > [p]. \quad (7.23)$$

Критические нагрузки $[p]$ для наиболее распространенных в машиностроении типов манжет представлены в табл. 7.6.

Тогда с учетом значения для K получим

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{пред}} T - I_{\text{доп}} T_{\text{рем}}. \quad (7.29)$$

Решая (7.28) относительно $I_{\text{доп}}$, окончательно получим для одной детали

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пред}} K}{K + 1}. \quad (7.30)$$

В качестве примера рассмотрим восстановление цилиндрической втулки ДВС. Например, по критерию качества работы ДВС при 80 % износа покрытия цилиндрической втулки получим $I_{\text{пред}} = 0,8[h] = 0,8 \cdot 0,8 = 0,64$ мм, где $[h] = 0,8$ мм – допустимая толщина покрытия. Определим необходимость четвертой ($K = 4$) расточки цилиндрической втулки при $I_{\text{пред}} = 0,64$ мм, если фактический замер толщины покрытия составил $h_{\text{фак}} = 0,55$ мм.

По формуле (7.30) окончательно допустимый износ

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{пред}} \frac{K}{K + 1} = 0,64 \frac{4}{5} = 0,51 \text{ мм.}$$

Следовательно, $I_{\text{доп}} = 0,51$ мм меньше фактической толщины покрытия, $h_{\text{фак}} = 0,55$ мм, т.е. очередная расточка втулки нецелесообразна.

Резиновая футеровка рудоразмельных шаровых мельниц.

Темп изнашивания броневой стали 110Г13Л для футеровки шаровых мельниц составляет в среднем 0,123...0,124 кг на 1 т перерабатываемой руды [34]. Подсчеты показывают, что для одной мельницы, например, МШЦ-2,7×3,6 (масса футеровки барабана ≈ 20т) потери из-за износа футеровки составляют более 8 т стали за 200...230 суток эксплуатации мельницы.

Замена стальных футеровочных плит на резиновую футеровку позволяет в 2–2,5 раза увеличить срок ее службы [35]. На рис. 7.8 представлен барабан рудоразмельной мельницы с резиновой футеровкой. Опыт эксплуатации рудоразмельных мельниц показывает, что применение резиновой футеровки вместо стальной брони не только повышает износостойкость, но также позволяет снизить

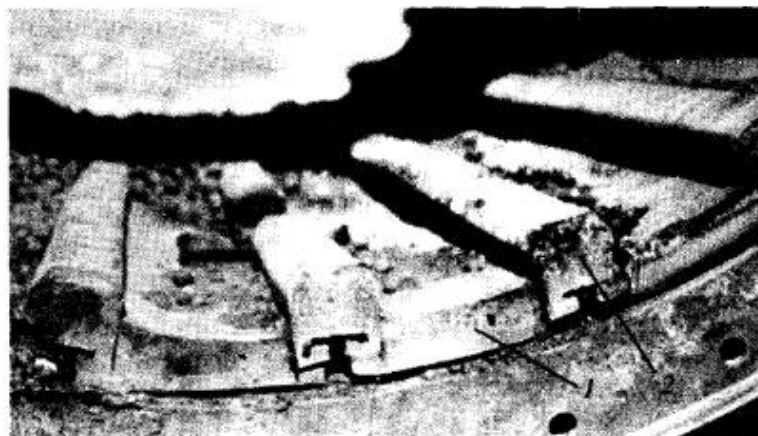


Рис. 7.8. Элемент барабана рудоразмельной мельницы с резиновой футеровкой:

1 – плита толщиной 70 мм; 2 – лифтер толщиной 110 мм

уровень производственного шума до санитарных норм и ниже, а также уменьшить содержание железа в продукте измельчения (очень актуально для цветной металлургии). Указанные преимущества достигаются без повышения удельного расхода электроэнергии и снижения производительности мельниц.

При сочетании в резиновой футеровке высоких эластических свойств и низкого значения динамического модуля (высокой податливости) можно резко повысить ее износостойкость при заданной толщине футеровки. Толщина резины, определяющая энергоемкость материала футеровки, в зависимости от крупности и скорости удара абразивных частиц может находиться в широких пределах, практически от 5 до 300 мм [33].

Износ эластичных материалов твердыми частицами связан не со всей кинетической энергией удара, а только с той частью, которая поглощается резиной в процессе удара, т.е. механическими потерями.

При нормальной температуре, нейтральной среде и скорости удара частиц ниже критической безразмерную интенсивность изнашивания резин I_W можно выразить уравнением в энергетической форме:

$$I_W = i_W e_n, \quad (7.31)$$

где i_W – удельный энергетический износ, $\text{м}^3/\text{Дж}$; e_n – плотность поглощенной энергии при ударе частиц о плоскость, $(\text{Дж}/\text{м}^3)$:

$$e_n = \frac{\chi W_k}{V_d}, \quad (7.32)$$

где χ – коэффициент механических потерь; W_k – кинетическая энергия частиц до удара, $\text{Дж}/\text{м}^3$; V_d – деформированный объем материала плоскости.

Коэффициент механических потерь при ударе сферической частицы о резиновую плоскость зависит от характера удара:

а) удар без скольжения ($\alpha \rightarrow 90^\circ$)

$$\chi_{б.ск} = \left(1 - \Delta \sin^2 \alpha - \frac{5}{7} \cos^2 \alpha \right);$$

б) удар со скольжением ($\alpha \rightarrow 0$)

$$\chi_{с.ск} = \left[1 - \Delta \sin^2 \alpha - \frac{5}{7} \cos^2 \alpha + f(1 + \sqrt{\Delta}) \sin 2\alpha - \Delta \sin^2 \alpha - 3,5 f^2 (1 + \sqrt{\Delta})^2 \sin^2 \alpha \right].$$

Угол граничной зоны α_r , разделяющий удары без скольжения и со скольжением, определяется из условия ($\chi_{б.ск} = \chi_{с.ск}$):

$$\alpha_r = \arctg \frac{2}{7f(1 + \sqrt{\Delta})}. \quad (7.33)$$

Для оценки износостойкости резиновых футеровок шаровых мельниц, применяемых в горнообогатительной промышленности, используем энергетическую теорию [34].

Для этого принимаем на основе экспериментальных исследований значения среднего удельного энергетического износа при гидроабразивном изнашивании резиновых образцов в пределах $i_W = (5 \dots 6) 10^{-13} \text{ м}^3/\text{Дж}$ [32].

Далее предполагаем, что изнашивание резиновой футеровки шаровой мельницы происходит ударами шаров наибольшего диаметра. Кинетическая энергия для одного шара определяется зависимостью

$$W_k = \frac{mv_{отн}^2}{2} = \frac{\pi d_{ш}^3 \rho_{ш} v_{отн}^2}{12}. \quad (7.34)$$

Деформированный объем материала футеровки при ударе шара (по Герцу):

$$V_d = F d_{ш} \rho_{ш}^{0,4} \left[\frac{5\pi(1 - \mu_p^2) v_{отн}^2 \sin^2 \alpha_0}{8E_d} \right], \quad (7.35)$$

где F – площадь проекции шара; $d_{ш}$ – диаметр наибольшего шара в загрузке; $\rho_{ш}$ – плотность материала шаров; μ_p – коэффициент Пуассона для резины; E_d – динамический модуль резины.

Относительная скорость удара шара по футеровке определяется на основе экспериментально-теоретических исследований для смешанного режима работы мельницы [34].

В качестве примера определим интенсивность изнашивания резиновой футеровки типа «плита + лифтер» мельницы второй стадии измельчения диаметром 2700 мм с шарами диаметром 60 мм в условиях Урупского ГОКа.

Определяем коэффициент механических потерь при ударе без скольжения для смешанного режима работы при $\alpha_0 = 33^\circ 17'$:

$$\chi = 1 - \Delta \sin^2 \alpha_0 = 1 - 0,5 \sin^2 33^\circ 17' = 0,352,$$

где $\Delta = 0,5$ – эластичность резины по отскоку; α_0 – угол граничной зоны.

Деформированный объем материала лифтера при ударе шара диаметром 60 мм:

$$V_d = F d_{ш} \rho_{ш}^{0,4} \left[\frac{5\pi(1 - \mu_p^2) v_{отн}^2 \sin^2 \alpha_0}{8E_d} \right] = 2,826 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-2} \times \\ \times (7,85 \cdot 10^3)^{0,4} \left[\frac{5\pi(1 - 0,5^2) \cdot 3,75^2 \cdot 0,549^2}{8 \cdot 13 \cdot 10^6} \right] = 1,826 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Здесь $F = 2,826 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $v_{\text{отн}} = 3,75 \text{ м/с}$, $\mu_p = 0,5$, $E_d = 13 \text{ МПа}$.
Кинетическая энергия шара:

$$W_k = \frac{m_{\text{ш}} v_{\text{отн}}^2}{2} = \frac{\pi(6 \cdot 10^{-2})^3 \cdot 7,85 \cdot 10^3 \cdot 3,75^2}{12} = 6,27 \text{ Дж}.$$

Плотность поглощенной энергии:

$$e_n = \frac{\chi W_k}{V_z} = \frac{0,352 \cdot 6,27}{18,26 \cdot 10^{-6}} = 1,21 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3.$$

Интенсивность изнашивания:

$$I_W = i_W e_n = 5,5 \cdot 10^{-13} \cdot 1,21 \cdot 10^5 = 6,65 \cdot 10^{-8}.$$

Полученное значение соответствует усталостному виду изнашивания и реальной картине изнашивания резиновой футеровки шаровых мельниц Урупского ГОКа [32].

Для количественной оценки срока службы резиновой футеровки Урупского ГОКа при ударах металлических шаров о резиновую плиту принимаем соотношение в виде:

$$I_{\text{ш}} = \frac{m}{m'},$$

где m – масса изношенного материала за весь срок службы резиновой футеровки t ; m' – масса изнашивающего материала (наибольших шаров), участвующего в износе резинового лифтера за указанный период t .

По опыту эксплуатации шаровых мельниц с резиновой футеровкой известно, что среднее значение массы изношенного материала одного лифтера составляет $m = 10,24 \text{ кг}$ [34].

Интенсивность изнашивания штатной резиновой футеровки выразим через параметры шаров, участвующих в процессе изнашивания футеровки:

$$I_{\text{ш}} = \frac{m}{m'} = \frac{6m}{\pi d_{\text{ш}}^3 \rho_{\text{ш}} z n t 60},$$

где $d_{\text{ш}} = 60 \text{ мм}$ – диаметр наибольших шаров; $\rho_{\text{ш}} = 7850 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала шаров; $z = 20$ – количество шаров диаметром

60 мм, которые могут одновременно наносить удары по лифтеру; $n = 20 \text{ мин}^{-1}$ – частота вращения барабана мельницы.

Из этого уравнения определим ресурс работы футеровки для мельниц Урупского ГОКа:

$$\tau = \frac{6m}{60 I_{\text{ш}} \pi d_{\text{ш}}^3 \rho_{\text{ш}} z n} = \frac{6 \cdot 10,24}{60 \cdot 6,65 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 0,06^3 \cdot 7,85 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 20} = 7500 \text{ ч}.$$

Этот показатель соответствует реальному ресурсу резиновой футеровки мельниц Урупского ГОКа ($\tau = 7100 \dots 7300$ часов) или 1–1,5 года эксплуатации.

При использовании шаров меньших размеров, например, диаметром 40 мм, срок службы по расчету может возрасти до 8000 ч.

В то же время при использовании шаров диаметром 100 мм для резиновой футеровки шаровых мельниц второй стадии измельчения срок службы уменьшится до 2600 ч, что меньше в полтора раза ресурса футеровки из стали 110Г13Л.

Приведенная выше методика расчета резиновой футеровки позволяет оценить ее работоспособность по износу для конкретных условий эксплуатации.

Однако при использовании этой методики необходимо учитывать толщину резиновых плит и лифтеров. Примеры расчета справедливы для резиновой футеровки мельниц второй стадии измельчения толщиной плит $h_n = 70 \text{ мм}$, лифтеров $h_n = 110 \text{ мм}$. При увеличении размера мельниц и размера шаров более 60 мм необходимо увеличивать толщину плит и высоту лифтеров. Практика показывает, что толщина резиновых плит должна в 1,2...1,5 раза превышать диаметр наибольшего шара.

Глава 8

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ
ИСПЫТАНИЯ НА ТРЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ

Одной из основных причин отказа машин в эксплуатации является выход из строя трибосопряжений. Отказы являются чаще всего следствием неправильного подхода при конструировании и изготовлении трибосопряжений. Очень часто в этом случае считается достаточным использование только прошлого опыта, вместо тщательного исследования и испытания модельных малогабаритных образцов, по результатам которых постепенно будут отсеиваться сочетания материалов, не подтвердившие соответствующую износостойкость по сравнению с серийными. Одновременно с этим с достаточно высокой точностью может быть оценена долговечность трибосопряжения и потери на трение с учетом того, что процессы трения и изнашивания сопровождаются многими явлениями, факторами и характеризуется различными механизмами поверхностного разрушения материала на контакте.

8.1. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Обычно при разработке конструкции трибосопряжения и при выборе материала для него возникает необходимость изучения влияния переменных условий, определяющих поведение реального сложного объекта. Такие трибологические задачи успешно решаются посредством моделирования [7].

Моделирование подразделяется на физическое, математическое, имитационное и аналоговое.

Физическим моделированием называют исследования физически подобных процессов на установках, сохраняющих физическую природу явлений, но воспроизводящих их в других размерах (геометрических, физических и т.д.) [10]. Особенностью модели

при физическом моделировании является ее одинаковая природа с натурным объектом. В обоих случаях применяются одни и те же пары трения и смазочные материалы.

При помощи физического моделирования решаются задачи выявления зависимостей коэффициента трения, интенсивности изнашивания и температуры трения от обобщенной информации о функционировании и свойствах трибосопряжений. Закон моделирования определяется в виде расчетного масштабного фактора, который является совокупностью всех масштабных коэффициентов перехода от модели к натуре (МКП) для параметров режима работы, материалов трибосопряжения и конструкции, включенных в критерии подобия [7].

Связи между параметрами модели и натуре предварительно устанавливаются расчетным путем. Расчетам обычно предшествует трехэтапный анализ моделируемых трибосистем.

Во-первых, система расчленяется на подсистемы в виде графических моделей, для каждой из которых применимы такие фундаментальные физические модели, как механическая (рис. 8.1, а), теплофизическая (рис. 8.1, б), макроконтрактивования (рис. 8.1, в) и микроконтрактивования (рис. 8.1, г).

Следует отметить, что эта модель – развивающаяся. Она может быть дополнена подмоделями, например, электрическими явлениями, химическими превращениями и т.д.

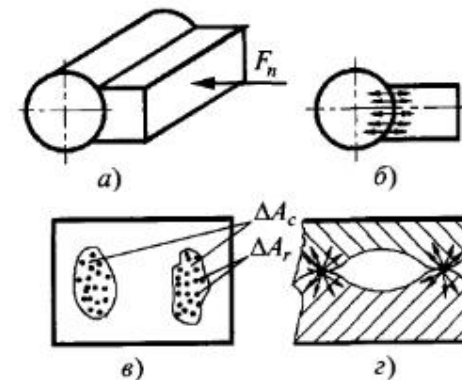


Рис. 8.1. Графические модели процесса трения

Для каждой подсистемы выявляются на основе априорной информации виды нарушения фрикционной связи по И. В. Крагельскому (см. табл. 3.1).

Во-вторых, на основе анализа графического изображения подсистем строится иерархическая модель, целью которой является выявление определяющих, основных и побочных параметров.

Определяющие параметры оказывают существенное влияние на все подсистемы, основные – только в пределах одной или нескольких подсистем, побочные – влияют несущественно (до 10...15 %) на трение или изнашивание.

В-третьих, устанавливается связь между функциональными зависимостями $f_x = \psi(P_{x1}, P_{x2}, \dots, P_{xi})$ выходных характеристик (коэффициента трения, интенсивности изнашивания, температуры трения и др.) от параметров $P_{x1} \dots P_{xi}$ исследуемого процесса для модели и аналогичными зависимостями для натуры $f_n = \psi(P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{ni})$, где, например, P_1 – скорость, P_2 – нагрузка и т. д.

Для установления такой связи применяют методы размерностей, подобия: энергетической, энергоинформационной и их комбинаций [7, 10].

Для облегчения расчетов по методам размерностей, подобия можно использовать стандартные программы для ЭВМ.

В качестве примера ниже приводится порядок расчета масштабного фактора энергетическим методом для случая трения трибосопряжения в среде исследуемого материала [26].

1. Построение уравнения энергетического баланса.

В общем случае для смазочного трибосопряжения оно имеет вид:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + \dots + W_{10}, \quad (8.1)$$

где W – энергия, генерируемая в процессе трения; W_1 – энергия, сообщенная узлу трения при внешнем прогреве; W_2 – поглощенная энергия; W_3 – энергия, отводимая в результате конвекции; W_4 – энергия, затраченная на теплоотдачу в смазочный материал; W_5 – энергия, затраченная на разрушение смазочного слоя; W_6 – энергия, затрачиваемая на структурные превращения в контактных материалах; W_7 – энергия на диспергирование этих материалов; W_8 – энергия на разрушение микронеровностей; W_9 – энергия на хими-

ческие превращения; W_{10} – энергия на деформирование микронеровностей.

2. Составление математического описания процессов.

Энергия, генерируемая в процессе трения, может быть определена по выражению

$$W = fF_nvt, \quad (8.2)$$

где f – коэффициент трения; F_n – нормальная нагрузка на контакте; v – скорость относительного перемещения; t – продолжительность процесса.

Энергия, сообщенная узлу трения при внешнем прогреве,

$$W_1 = c_{1,2,3} \cdot m_{1,2,3} \cdot \Delta T_{G1,2,3},$$

где $c_{1,2,3}$ – удельная теплоемкость контактирующих материалов и разделяющего их слоя смазочного материала; $m_{1,2,3}$ – масса элементов трибосопряжения; $\Delta T_{G1,2,3}$ – повышение температуры в результате предварительного подогрева элементов трибосопряжения.

Поглощенная энергия

$$W_2 = c_{1,2,3} m_{1,2,3} \Delta T_{\delta 1,2,3},$$

где $\Delta T_{\delta 1,2,3}$ – повышение температуры в результате фрикционного подогрева элементов трибосопряжения.

Энергия, отводимая в результате конвекции,

$$W_3 = \sigma_{1,2} A_{\sigma 1,2},$$

где $\sigma_{1,2}$ – коэффициент теплоотдачи элементов трибосопряжения; $A_{\sigma 1,2}$ – площади их теплоотдающих поверхностей.

Энергия, затраченная на теплоотдачу в смазочный материал,

$$W_4 = \lambda A_{\sigma 3} \Delta T_3 \frac{t}{h},$$

где λ – коэффициент теплопроводности; $A_{\sigma 3}$ – площадь теплоотдающей поверхности смазочного материала; ΔT_3 – температура смазочного материала; t – время; h – толщина смазочного слоя.

Энергия, затраченная на разрушение смазочного слоя,

$$W_5 = E_a A_r,$$

где E_a – удельная энергия, затрачиваемая на разрушение смазочного слоя; A_r – площадь фактического контакта.

Энергия, затрачиваемая на структурные превращения в контактных материалах,

$$W_6 = \Delta\sigma_{1,2}\Delta V_{д1,2} = \Delta\sigma_{1,2}h_{д1,2}A_{д1,2},$$

где $\Delta\sigma_{1,2}$ – изменение напряженного состояния вследствие изменения структуры материала; $\Delta V_{д1,2}$ – деформированный объем; $h_{д1,2}$ – толщина деформированного слоя; $A_{д1,2}$ – площадь деформированного участка.

Энергия на диспергирование этих материалов

$$W_7 = A_{д1,2}\mu_{1,2}\tau_{ад}n_{ц},$$

где $\mu_{1,2}$ – коэффициенты Пуассона; $\tau_{ад}$ – адгезия отделяемой частицы; $n_{ц}$ – число циклов нагружения до отделения частицы износа.

Энергия на разрушение микронеровностей

$$W_8 = \frac{f^2 F_n^2 R A_a}{A_c^2 EK},$$

где R – высота неровностей; A_a – номинальная площадь контакта; E – модуль упругости; K – коэффициент, учитывающий направление штрихов обработки относительно направления трения.

Энергия на химические превращения

$$W_9 = \Delta H m_r,$$

где ΔH – удельная теплота, выделяемая (или поглощаемая) при химических превращениях в смазочном материале; m_r – число молей в рабочем объеме масла.

Энергия на деформирование микронеровностей

$$W_{10} = \delta_{1,2} F_n,$$

где $\delta_{1,2}$ – деформация контактирующих поверхностей.

3. Получение безразмерных комплексов критериев.

Уравнение (8.1) преобразуется в уравнение подобия, для чего правая его часть делится на левую. В результате получаются безразмерные выражения типа

$$\pi_1 = W_1/W; \quad \pi_2 = W_2/W; \quad \dots; \quad \pi_n = W_n/W,$$

рассматриваемые при моделировании как критерии подобия, т.е. они должны быть равны как у модели, так и у натурального объекта. В симплексной форме они имеют вид:

$$C_{\pi 1} = \frac{\pi'_1}{\pi_1} = 1; \quad C_{\pi 2} = \frac{\pi'_2}{\pi_2} = 1; \quad \dots; \quad C_{\pi n} = \frac{\pi'_n}{\pi_n} = 1,$$

где π и π' – критерии подобия соответственно на модели и натуре.

Замкнутое математическое описание может быть получено путем совместного решения полученных уравнений.

4. Составление предварительного уравнения подобия.

Для получения единственного значения масштабного фактора необходимо и достаточно иметь замкнутое описание исследуемого процесса, т.е. число критериев n_k должно быть равно числу параметров уравнения m_k .

Уравнение подобия имеет вид:

$$C_{\varphi} = \varphi(C_{\pi 1}; C_{\pi 2}; C_{\pi 3}; \dots; C_{\pi n}). \quad (8.3)$$

Подставляя в него значения $C_{\pi 1}$, $C_{\pi 2}$, $C_{\pi 3}$ и т.д. убеждаемся, что $n_k > m_k$ (например $n_k = 26$, $m_k = 10$). Чтобы получить замкнутую систему уравнений, необходимо и достаточно ввести $(n_k - m_k)$ крайних условий, например, равенство материалов на модели и натуре: $C_{c1,2,3} = 1$, $C_{\lambda} = 1$, $C_E = 1$, $C_{\mu} = 1$, $C_{\tau_{ад}} = 1$, $C_{m_i} = 1$, поскольку на модели и натуре изучается один и тот же смазочный материал, то $C_{Ea} = 1$; $C_{\Delta H} = 1$. Обязательно при этом, чтобы крайние условия включали параметры, которые оказывают существенное влияние на исследуемые технические процессы.

В зависимости от введения крайних условий значение масштабных коэффициентов перехода (МКП) могут меняться.

Некоторые (или все) имеющиеся геометрические величины выражают через комплекс геометрических параметров:

$$K_{r1,2} = \frac{A_a A_{ar}}{S_1 S_2},$$

где A_a – номинальная площадь трения; S – отношение свободных (не находящихся в контакте) поверхностей A_a контактирующих деталей к теплопоглощающему объему V_a (индексы 1 и 2 относятся соответственно к 1-му и 2-му элементам трибосопряжения).

Общий комплекс геометрических размеров, в которых учитывают размеры модельного и натурального объекта, имеют вид:

$$S_{r1,2} = \frac{A'_{al} A'_{ar}}{S'_1 S'_2} \frac{S_1 S_r}{A_{al} A_{ar}},$$

где A'_a и S' относятся к модели, а A_a и S – к натурному образцу.

При расчете комплекса геометрических размеров учитывают реальную форму контактирующих образцов (отверстия, ребра и т.д.). Для пары длинный вал–узкий подшипник учитывают глубину проникновения тепла в вал. Обычно принимают значение $D_{эф}$ от двух до трех диаметров вала.

Чтобы превратить критериальное уравнение в систему уравнений – критериев, каждый из критериев линеаризуют путем логарифмирования, после чего каждый критерий в симплексной форме представляет собой один из элементов системы уравнений, описывающий исследуемый процесс.

5. Проверка совместимости уравнений критериев.

При преобразовании уравнений они могут оказаться несовместимыми. Поэтому необходима проверка уравнений на совместимость.

Система совместима тогда, когда ранг расширенной матрицы A^* равен рангу основной матрицы A . При расчете масштабного фактора получают, как правило, основную ступенчатую матрицу. Достаточно установить, являются ли ненулевые точки $i, i+1, i+2$ основной матрицы [10].

Если расширенная матрица (т.е. такая, в которую входит правая часть уравнения – свободный член) имеет больший ранг, то система не совместима. Существует также методика проверки совместимости уравнений по стандартной программе на ЭВМ [7].

6. Решение уравнений подобия.

Совместное решение уравнений проводится в матричной форме. При этом в правую часть уравнения переносят члены, содержащие комплекс геометрических параметров. В результате получают значения параметров модели в виде

$$P' = PC_r^\alpha, \quad (8.4),$$

где P – параметр натурности; P' – соответствующий параметр модели; α – показатель степени;

$$C_{r1,2} = \frac{K_{gm1,2}}{K_{gn1,2}}.$$

Анализ уравнения (8.4) показывает, что испытания на моделях можно проводить при меньших нагрузках, скоростях скольжения, меньшем времени испытаний и т.д. Учет масштабного фактора позволяет получать на модели фрикционно-износные характеристики такие же, как в натурном трибосопряжении.

Математическое моделирование основано на математическом подобии и на изоморфизме уравнений, т.е. их способности описывать различные по природе явления и выявлять различные функциональные связи, используя способность уравнений описывать отдельные стороны поведения системы [10, 40].

Теория подобия является основой для создания алгоритма определенной последовательности вычислительных операций, связывающего методы эксперимента с вычислительной техникой.

При построении модели реальное явление неизбежно упрощается, схематизируется, и эта схема (чаще всего графическая модель явления) описывается с помощью того или другого математического аппарата.

Модель создается с учетом целевой направленности задачи исследования, требуемой точности и предварительно известной информации.

При математическом моделировании применяются аналитические и статистические модели. Аналитические модели учитывают меньшее число факторов, всегда требуют каких-то допущений и упрощений. Однако результаты расчета по ним лучше обозримы, отчетливо отражают присущее явлению основные закономерности и, главное, больше приспособлены для поиска оптимальных решений.

Статистические модели более точны и подробны, не требуют больших допущений, позволяют учесть большее число факторов.

Недостатками являются: громоздкость, плохая обозримость, большой расход машинного времени, и главное – трудность поиска оптимальных решений, которые приходится искать методом проб и ошибок.

Имитационное моделирование – методология экспериментально-теоретического решения технических задач [10]. Оно при-

меняется к процессам, в ход которых может время от времени вмешиваться человек (испытатель).

Человек, руководящий операцией, может в зависимости от сложившейся обстановки принимать те или другие решения. Затем приводится в действие математическая модель, которая показывает, какое ожидается изменение обстановки в ответ на это решение и к каким последствиям оно приведет спустя некоторое время. Следующее решение испытатель принимает уже с учетом новой обстановки и т.д. В результате многократного повторения такой процедуры испытатель принимает наиболее правильное решение, которое можно отнести к числу оптимальных.

Аналоговое моделирование базируется на одинаковом для модели и природы математическом описании и используется для имитации на основе аналогий физической системы по ее элементам. При этом каждому из физических элементов природы в модели соответствует определенный элемент. В качестве моделей используются электрические цепи, составленные из пассивных элементов 1, 2, 3 и т.д., источников тока, напряжения и электронных операционных усилителей.

Так, например, в электрическом аналоговом моделировании тепловых и силовых полей в трибосопряжении применяют метод сплошной среды и метод электрических сеток [42].

В первом случае моделью служит поле электрического тока в сплошной проводящей среде (пластины, электропроводящая бумага). Во втором – электрические цепи с сосредоточенными параметрами. Модель в этом случае представляет электрическую сетку, в которой дискретно расположены схемы замещения.

Метод сплошной среды отличается простотой и большой точностью соответствия между граничными условиями природы и модели.

Метод электрических сеток более универсален и используется обычно для исследований неоднородных физических полей. В частности, при помощи электропроводной бумаги различных сортов можно имитировать различные теплофизические свойства материалов пар трения.

Более подробно о моделировании стационарных и нестационарных процессов трения и изнашивания при различных условиях смазки можно ознакомиться в работах [7, 8, 40].

8.2. ИСПЫТАНИЯ НА ТРЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ

На трение и изнашивание влияет большое количество факторов, которые можно разделить на следующие группы [8, 23, 25, 40]:

1) физико-механические свойства материалов и геометрия контактируемых поверхностей, определяющих фрикционное поведение трибосопряжения (пределы текучести и прочности, твердость, микроструктура, химический состав, степень наклепа, остаточное напряжение);

2) эксплуатационные факторы, влияющие на физико-механические свойства материалов и геометрию контакта (скорость скольжения, величина и характер нагрузки, температурный режим, наличие абразива, смазочных материалов или покрытий на трущихся поверхностях и т.д.);

3) конструктивные особенности узла трения, влияющие на трение и изнашивание через температуру, нагрузку и скорость скольжения (условия теплопроводности, распределения температурных полей и нагрузок, род трения – качения или скольжения, зазоры в сопряжениях и др.).

Испытания материалов, определяющие их антифрикционные (фрикционные) свойства и износостойкость, целесообразно проводить в следующей последовательности:

– первый этап – лабораторные испытания с целью получения физико-механических характеристик и прогнозирования по ним фрикционных свойств. Допускается использование справочных данных для конкретных материалов, лучше на основании ГОСТов;

– второй этап – лабораторные исследования влияния различных факторов (скорости, нагрузки, температуры окружающей среды и др.) на фрикционные свойства и износостойкость пары трения;

– третий этап – стендовые испытания, предназначенные для оценки влияния конструктивных особенностей трибосопряжения на антифрикционные (фрикционные) свойства и изнашивание материалов;

– четвертый этап – натурные (промышленные) испытания, используемые для определения эксплуатационных характеристик узла трения, в том числе надежности и долговечности их в реальных условиях.

Первые два этапа, с использованием метода моделирования, позволяют приблизительно оценить возможность применения материалов или покрытий в тех или иных узлах трения на стадии конструирования машины или механизма.

Трибологические свойства пар трения обычно оценивают на лабораторных установках. По кинематическому признаку все установки для испытания материалов трением можно подразделить на два больших класса:

- I – установки однонаправленного перемещения;
- II – знакопеременного относительного перемещения.

Внутри каждого класса установки разделяются на две группы:

- а) машины торцевого трения;
- б) машины трения с контактом по образующей.

С учетом коэффициента взаимного перекрытия контактируемых поверхностей предложено более 32 схем узлов трения испытательных машин [23].

Американским Комитетом по изнашиванию и эрозии утверждено более 47 стандартов ASTM на испытания различных материалов на трение и износ на соответствующих установках [44], а с учетом дополнений к стандарту ASTM, публикуемых Американским обществом трибологов и инженеров-смазочников (рис. 8.2–8.8), около сотни методов.

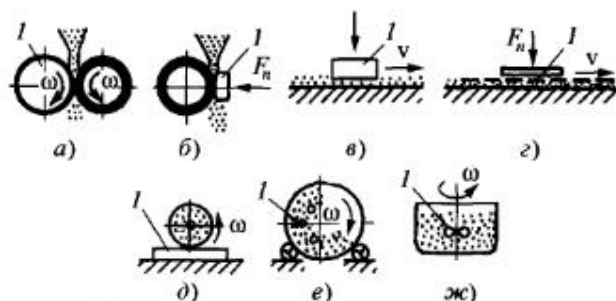


Рис. 8.2. Схемы испытаний на абразивный износ (I – испытуемый образец):

- $a, b, в$ – испытания по методу трех тел; $г, д$ – по методу двух тел;
- $e, ж$ – в среде частиц; a – трение диск по диску; $б$ – трение по резиновому колесу с песком; $в$ – трение при высоких напряжениях; $г$ – трение по закрепленному абразиву; $д$ – трение по абразивному камню; e – износ в барабане; $ж$ – износ в мешалке

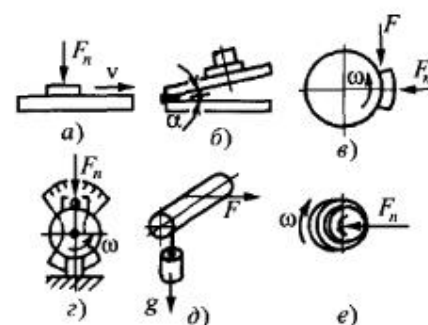


Рис. 8.3. Схемы
фрикционных испытаний:
 a – с ползунком; $б$ – с наклонной плоскостью; $в$ – с тормозной колодкой; $г$ – с маятником; $д$ – со шкивом; e – с дисковой муфтой

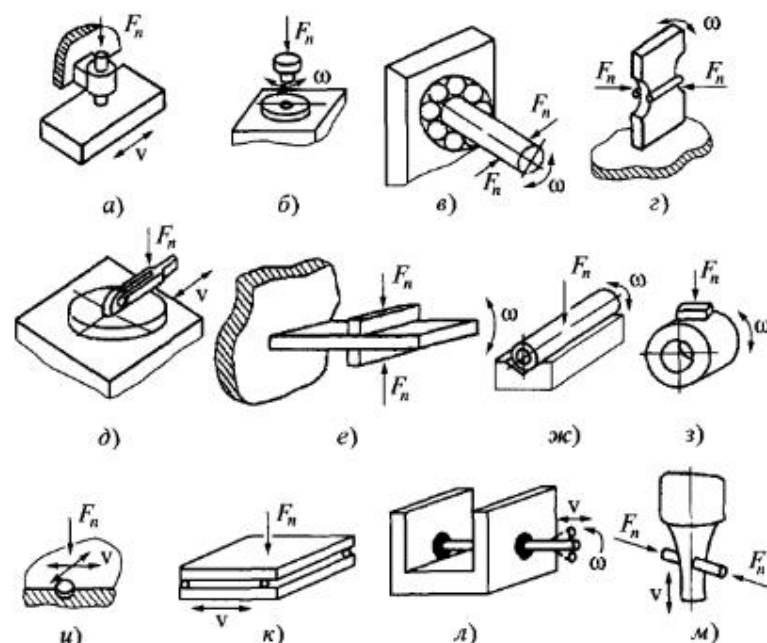


Рис. 8.4. Схемы испытаний на трение:

- a – полусфера по плоскости; $б$ – шайба по шайбе; $в$ – вал в шарикоподшипнике; $г$ – перемычка с цилиндрами; $д$ – плоскость по плоскости; e – перемычка с пластиками; $ж$ – цилиндр по плоскости; $з$ – колодка по кольцу; $и$ – шарик в лунке; $к$ – шарики по плите; $л$ – вал-консоль; $м$ – с ультразвуком

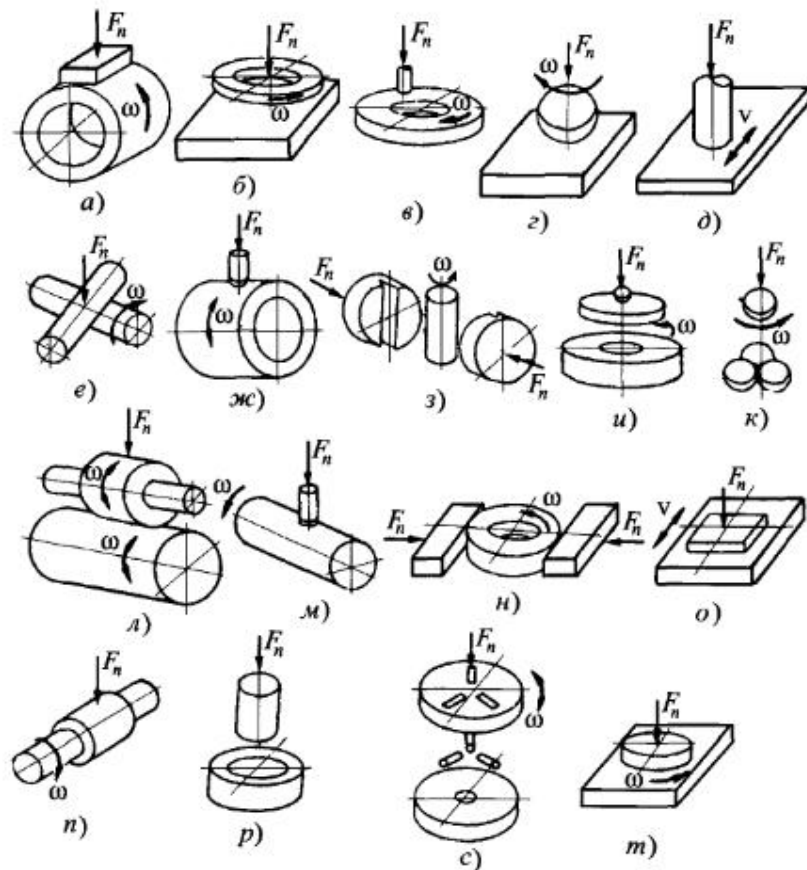


Рис. 8.5. Схемы испытаний на износ металлических сопряжений:

a – колодка по кольцу; *б* – кольцо по плоскости; *в* – полусфера по диску; *г* – сфера на плоскости; *д* – полусфера по плоскости; *е* – скрещенные цилиндры; *ж* – полусфера по цилиндру; *з* – клиновые колодки по кольцу; *и* – торцовая шайба; *к* – четырехшариковая схема; *л* – соосные цилиндры; *м* – палец по цилиндру; *н* – две колодки по кольцу; *о* – плоскость по плоскости; *п* – втулка по валу; *р* – испытания при запрессовке; *с* – скользящие ролики; *т* – диск по плоскости

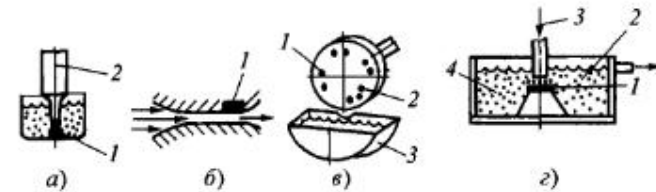


Рис. 8.6. Методы кавитационных испытаний:
a – испытания при ультразвуковой кавитации (*1* – образцы, *2* – ультразвуковой излучатель); *б* – испытания в ячейке Вентури (*1* – образец); *в* – испытание в сосуде (*1* – образец, *2* – возбудители кавитации, *3* – сосуд); *г* – испытания в струе высокого давления (*1* – образец, *2* – жидкость, *3* – подача жидкости под давлением, *4* – зона кавитации)

Рис. 8.7. Испытания на эрозию твердыми частицами (*I* – образец):

a – износ в псевдосжиженном слое; *б* – соударение с единичной частицей; *в* – соударение с качающимся ударником; *г* – струйная эрозия; *д* – эрозия в изогнутом патрубке; *е* – эрозия в падающей струе

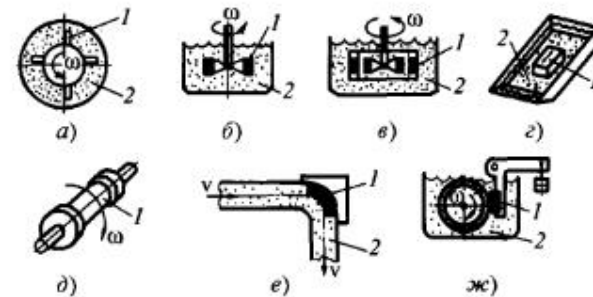
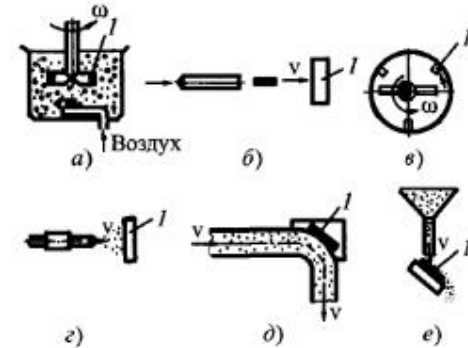


Рис. 8.8. Испытания образцов *1* на эрозию в суспензии (абразивной массе) *2*:

a – в сосуде с суспензией; *б* – пропеллер в суспензии; *в* – по методу NACE; *г* – по Миллеру; *д* – вращающаяся труба с суспензией; *е* – в изогнутом патрубке; *ж* – по резиновому колесу

Для реализации методов моделирования трения и внедрения рационального цикла испытаний триботехнических материалов применяются новые отечественные универсальные машины трения и испытательные комплексы типа УМТ-2168 и ИИ-5018, разработанные ИМАШ и ПО «Госприбор». Так, например, испытательный комплекс УМТ-2168 «Унитриб», благодаря сменным рабочим узлам, позволяет выполнять испытания последовательно при восьми схемах контактирования в автоматизированном режиме (табл. 8.1).

8.1. Схемы узлов трения испытательного комплекса УМТ-2168 «Унитриб»

Серийный узел трения	Модель на УМТ-2168 «Унитриб»
<i>Поступательное движение</i>	
Дисковый тормоз, муфта, упорный подшипник, $K_{вз} \approx 1$ и $K_{вз} < 1$	
Подшипник скольжения, $K_{вз} \approx 1$ и $K_{вз} < 1$	
Тормоз вагона, тормоз подъемного крана, $K_{вз} < 1$	
Трение при значительно высоких скоростях, $K_{вз} < 1$ и $K_{вз} \ll 1$	
<i>Возвратно-поступательное движение</i>	
Шарнир, $K_{вз} \approx 1$	

Продолжение табл. 8.1

Серийный узел трения	Модель на УМТ-2168 «Унитриб»
Трубный пучок теплообменника, $K_{вз} \ll 1$	
Опоры скольжения и направляющие, $K_{вз} \ll 1$ и $K_{вз} \rightarrow 0$	
Любые узлы при высоких контактных давлениях, $K_{вз} \ll 1$ и $K_{вз} \rightarrow 0$	

Полученная от датчиков информация об изменении режимов испытания, трения, температуры и т.д. одновременно обрабатывается на ЭВМ, входящей в комплекс.

Процессы, сопровождающие трение и износ, весьма разнообразны и зависят от многих факторов, условий трения, материалов, геометрии контакта и др. По этой причине общих закономерностей, связывающих различные параметры трения, очень мало. Рассмотрим некоторые из них, которые следует иметь в виду при проведении экспериментов на стандартных или вновь разработанных установках.

С возрастанием нагрузки при упругом контакте коэффициент трения снижается (участок ABC_1) (рис. 8.9). Если упругий контакт переходит в пластический (точка B), то зависимость f от F будет описываться кривой ABC . Износ, как и коэффициент трения, для неприработанных по-

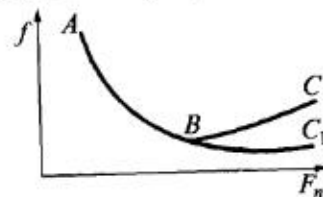


Рис. 8.9. Зависимость коэффициента трения от нагрузки

верхностей зависит от нагрузки обычно нелинейно. Для приработанных поверхностей интенсивность изнашивания прямо пропорциональна удельной нагрузке [10]. Температура во фрикционном контакте при увеличении нагрузки растет, уменьшая адгезионную составляющую коэффициента трения. Деформационная составляющая связана в основном с твердостью материалов, которая также зависит от температуры.

Скорость скольжения в первую очередь влияет на мощность тепловыделения и температуру контакта. Высокие температуры и воздействие механохимических процессов вызывают коренные изменения в материале, и поверхностный слой приобретает качественно новые механические свойства.

Влияние скорости скольжения на триботехнические свойства изучено еще недостаточно. Во многих случаях зависимость коэффициента трения от скорости может характеризоваться кривыми, изображенными на рис. 8.10.

Качество поверхности, которое характеризуется в основном геометрическими и физико-химическими свойствами тонких слоев, существенно влияет на триботехнические характеристики и изнашивание пар трения.

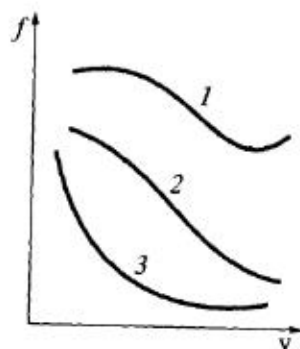


Рис. 8.10. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения:

1 – низкое давление; 2 – среднее давление; 3 – большое давление

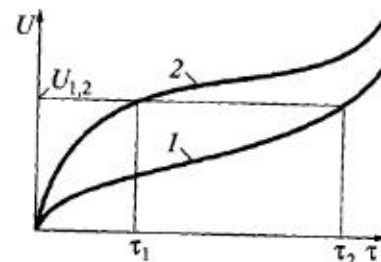


Рис. 8.11. Характер изменения износа деталей, имеющих различное качество поверхностей

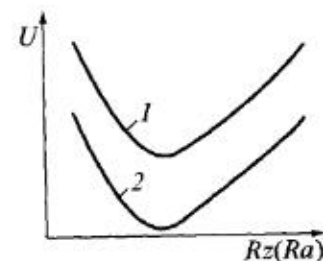


Рис. 8.12. Качественная зависимость износа от шероховатости поверхности:

1 – легкие условия эксплуатации;
2 – тяжелые условия эксплуатации

Различают технологическое (исходное) и эксплуатационное качество поверхности. Переход от исходного состояния поверхностей трения к установившемуся (равновесному) сопровождается сложными необратимыми явлениями, рассматриваемыми в гл. 2.

Экспериментаторам необходимо учитывать это, и оценку интенсивности изнашивания различных образцов производить только после завершения приработочного периода.

Приработка оказывает значительное влияние на продолжительность испытания (работы) трибосопряжения. За счет сокращения приработочного износа срок службы деталей можно значительно увеличить (рис. 8.11).

Существенное влияние на износ при приработке оказывает микрогеометрия поверхности (рис. 8.12).

Приведенные зависимости показывают, что различным условиям работы (испытания) соответствует своя оптимальная (равновесная) шероховатость. Износ, время приработки и коэффициент трения при этом будут минимальными. Однако оптимальное состояние поверхностного слоя образцов недостаточно оценивать только параметрами микрогеометрии. Необходимо учитывать также степень и глубину наклепа, остаточные напряжения, структуру (см. гл. 2).

Внешняя среда существенно влияет на процессы трения и изнашивания. Вид изнашивания и его интенсивность зависят от состава газовой среды, наличия смазочных материалов или абразивных частиц в зоне трения. Правильно подобранные смазочные материалы резко снижают износ и коэффициент трения. Наличие абразива в зоне трения вызывает при испытании интенсивное изна-

шивание образцов. Все это необходимо учитывать при разработке методики и проведении лабораторных испытаний на трение и износ.

Обеспечение стабильности испытаний пар трения в агрессивных средах (щелочи, кислоты, газы, грибковые образования и др.) также являются сложной задачей и должны учитываться при планировании испытаний.

Для сокращения сроков проведения экспериментов и получения достоверных сведений об исследуемых процессах трения и изнашивания применяются методы планирования эксперимента и математической статистики [16, 39].

8.3. ОБЩАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ТРЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ

Экспериментальные методы еще длительное время будут основными при изучении износостойкости материалов и деталей машин. При организации испытаний материалов и деталей машин на трение и износ, кроме очень важных вопросов моделирования, не менее важным является разработка программы и методики испытаний [9, 23, 32, 35, 41, 44].

Постановка задачи – это очень важная часть работы, так как из правильно сформулированной задачи вытекает и цель исследования. Эта работа не является тривиальной, так как необходимо заранее обдумать всю программу испытаний и в соответствии с ней – методику проведения экспериментов. Вот как ее формулирует американский исследователь К. Дж. Будински [44].

1. Задача – решить поставленную проблему износа; цель – вернуть машину в работоспособное состояние.

2. Задача – предотвратить возникновение известной проблемы износа в новой системе; цель – обеспечить требуемую работоспособность машины.

3. Задача – классифицировать материалы или виды обработки по износостойкости; цель – получить исходные данные для выбора материалов или видов обработки для обеспечения оптимальной работоспособности.

4. Задача – исследовать механизм изнашивания; цель – создать или подобрать материалы, стойкие к изнашиванию в заданных условиях.

5. Задача – разработать износостойкие материалы или виды обработки, повышающие износостойкость; цель – получить прибыль при продаже материалов или технологий.

Подход к выбору программы испытаний на износ будет зависеть от конкретной задачи и цели. Например, если необходимо знать, какой из используемых нами полимеров будет работоспособным при изготовлении из него втулки для работы в паре со стальным валом в конкретном агрегате, то фактически это граничные условия для программы испытаний – ограничена область выбора материалов и известны рабочие условия трибосопряжения. Следующий порядок очевиден: выбор испытательной машины и несколько вариантов полимеров, разработка программы испытаний и ее исполнение для выбора лучшего из вариантов полимера.

Если целью является разработка износостойкого диффузионного покрытия с целью его коммерческой реализации, программа испытаний будет совсем иной. Разрабатываемое покрытие может быть использовано в различных условиях, и поэтому необходимо оценить его в этих условиях, чтобы успешно его реализовать. Так, например, покрытие, отлично работающее при трении металла по металлу, может быстро разрушиться в условиях гидроабразивного или газоабразивного изнашивания.

Это и будет ограничением, которое необходимо четко сформулировать в задаче и цели испытания и в соответствующей программе исследования.

Определение вида изнашивания. В соответствии с классификацией видов изнашивания, подробно рассматриваемой в гл. 5, среди российских трибологов установилось почти единое мнение о следующих видах изнашивания:

а) механическая группа: абразивное, усталостное, кавитационное, эрозионное и адгезионное. Эта группа включает следующие подвиды абразивного изнашивания: трение о закрепленный абразив, в абразивной массе, в абразивной прослойке, газоабразивное, гидроабразивное и ударно-абразивное изнашивание;

б) коррозионно-механическая группа: окислительное, водородное и фреттинг-коррозия;

в) электроэрозионное.

Сложность в установлении вида изнашивания состоит в том, что в реальных условиях изнашивания могут проявляться или один или сразу несколько видов изнашивания. Установить вид изнашивания помогает тщательный анализ причин износа реальных деталей. Так, например, изучая реальную картину износа сит грохотов на предприятиях по добыче инертных строительных материалов можно заметить, что сита изнашиваются меньше по ячейкам, а больше там, где песок и гравий падает с конвейера на сито грохота. Характер износа в этих условиях, естественно, абразивный с преобладанием износа от ударного воздействия абразива о сита грохота. Вторичным является менее интенсивный износ ячеек сетки в результате вибрационного воздействия песка на сетку. Поэтому вопросу определения вида изнашивания следует уделять особое внимание. Лучше всего такое изучение проводить не на одном предприятии, а на нескольких с тщательным анализом условий работы и износа реальных деталей, с обязательным фотографированием картины износа, замером величины износа и отметкой времени за которое износ этой детали произошел. Безусловно, необходимо отмечать в протоколе: гранулометрический состав абразива, высоту падения массы на сито грохота, скорость падения, влажность массы, наличие крупных камней в массе, амплитуду и частоту колебаний грохота, степень налипаемости сит и способы очистки сит от налипания, период работы грохота (зима, осень, весна, лето) и т.д. Все это будет необходимо для последующих испытаний опытных образцов, как в лабораторных, так и в натурных условиях.

Определение трибосистемы. Одна из проблем при изучении изнашивания при трении состоит в том, что триботехнические характеристики относятся не просто к определенному материалу, а к процессу взаимодействия материалов в относительном движении. В этом случае имеют значение и свойства материалов, и геометрия

и свойства поверхностей в динамике. Очень плодотворным является системный подход к трибосопряжениям [47]. Трибосистема в этом случае (рис. 8.13) включает элементы, находящиеся в относительном движении, окружающую среду и взаимосвязи между элементами системы. В качестве элементов трибосистемы могут выступать как твердые тела при скольжении, так и, например, твердое тело, подверженное кавитации в контакте с жидкостью.

Входной характеристикой трибосистемы является работа в форме механического воздействия на материалы в контакте. Эта характеристика может оцениваться такими параметрами, как скорость скольжения, нормальная нагрузка, путь скольжения и т.д.

Входной характеристикой трибосистемы является работа. Выходной характеристикой системы является полезная работа, которая может иметь различные формы движения: кулачкового механизма, транспортирование сыпучего груза или качение колеса поезда. На трибосистему действуют возмущающие факторы, например, повышение (понижение) температуры, вибрация, загрязнения, а также такие отклонения от кинематики движения, как биение

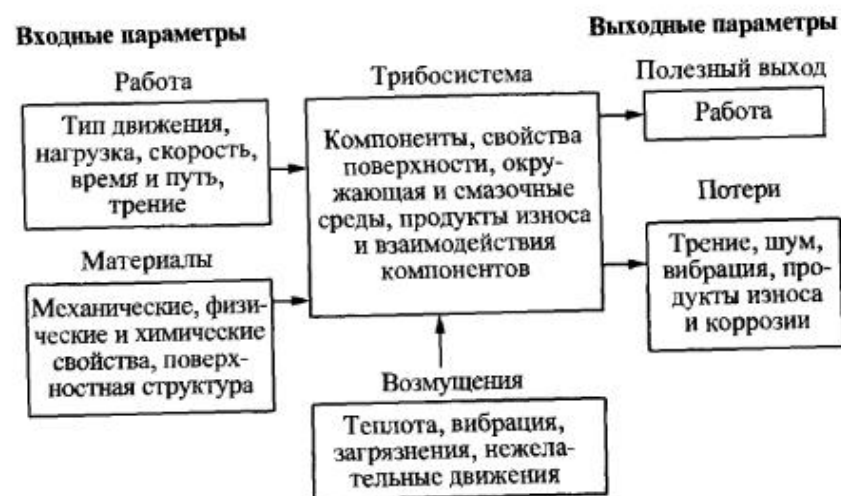


Рис. 8.13. Трибосистема

б) коррозионно-механическая группа: окислительное, водородное и фреттинг-коррозия;

в) электроэрозионное.

Сложность в установлении вида изнашивания состоит в том, что в реальных условиях изнашивания могут проявляться или один или сразу несколько видов изнашивания. Установить вид изнашивания помогает тщательный анализ причин износа реальных деталей. Так, например, изучая реальную картину износа сит грохотов на предприятиях по добыче инертных строительных материалов можно заметить, что сита изнашиваются меньше по ячейкам, а больше там, где песок и гравий падает с конвейера на сито грохота. Характер износа в этих условиях, естественно, абразивный с преобладанием износа от ударного воздействия абразива о сита грохота. Вторичным является менее интенсивный износ ячеек сетки в результате вибрационного воздействия песка на сетку. Поэтому вопросу определения вида изнашивания следует уделять особое внимание. Лучше всего такое изучение проводить не на одном предприятии, а на нескольких с тщательным анализом условий работы и износа реальных деталей, с обязательным фотографированием картины износа, замером величины износа и отметкой времени за которое износ этой детали произошел. Безусловно, необходимо отмечать в протоколе: гранулометрический состав абразива, высоту падения массы на сито грохота, скорость падения, влажность массы, наличие крупных камней в массе, амплитуду и частоту колебаний грохота, степень налипаемости сит и способы очистки сит от налипания, период работы грохота (зима, осень, весна, лето) и т.д. Все это будет необходимо для последующих испытаний опытных образцов, как в лабораторных, так и в натурных условиях.

Определение трибосистемы. Одна из проблем при изучении изнашивания при трении состоит в том, что триботехнические характеристики относятся не просто к определенному материалу, а к процессу взаимодействия материалов в относительном движении. В этом случае имеют значение и свойства материалов, и геометрия

и свойства поверхностей в динамике. Очень плодотворным является системный подход к трибосопряжениям [47]. Трибосистема в этом случае (рис. 8.13) включает элементы, находящиеся в относительном движении, окружающую среду и взаимосвязи между элементами системы. В качестве элементов трибосистемы могут выступать как твердые тела при скольжении, так и, например, твердое тело, подверженное кавитации в контакте с жидкостью.

Входной характеристикой трибосистемы является работа в форме механического воздействия на материалы в контакте. Эта характеристика может оцениваться такими параметрами, как скорость скольжения, нормальная нагрузка, путь скольжения и т.д.

Выходной характеристикой трибосистемы является работа. Выходной характеристикой системы является полезная работа, которая может иметь различные формы движения: кулачкового механизма, транспортирование сыпучего груза или качение колеса поезда. На трибосистему действуют возмущающие факторы, например, повышение (понижение) температуры, вибрация, загрязнения, а также такие отклонения от кинематики движения, как биение



Рис. 8.13. Трибосистема

вращающихся масс. Все эти факторы могут влиять на трибосистему, ее полезную работу и величину износа. Выходными характеристиками трибосистемы являются результаты процессов изнашивания, в конечном счете приводящие к разрушению системы: тепловыделение, трение, отделение частицы материала при изнашивании, шум и т.д.

Следует отметить, что испытание, моделирующее одну систему, не обязательно обеспечивает получение данных, приложенных к другой системе. Так, например, данные по абразивной износостойкости не пригодны для анализа подшипников качения. Поэтому эффективный метод трибоиспытаний должен моделировать конкретную систему.

Представление данных испытаний. Общей частью методологии любых испытаний являются представление и обработка данных, полученных в процессе испытаний. Независимо от вида испытательной техники параметры, соответствующие определенным факторам, должны регистрироваться в соответствующем журнале, оформляемом в форме протокола. Главными элементами протокола являются:

- рабочие параметры (тип движения, продолжительность работ, нагрузка, скорость, температура, другие рабочие переменные местонахождения объекта);

- структура трибосистемы:

- а) полное описание испытуемых материалов (геометрия, размеры, объем, химический состав), физико-механические данные (твердость, вязкость и др.);

- б) описание испытуемых поверхностей (Rz , Ra), площади контакта (A_n , A_c , A_r) и др.;

- в) описание внешней среды (смазка и т. д.).

- трибологические характеристики (изменение свойств элементов, например твердости, вязкости, влажности, данные о трении, в зависимости от времени t , пути s , данные об износе в зависимости от времени, пути);

- другие характеристики (например, вибрация, шум), а также вид изношенной поверхности.

Отдельные элементы протокола могут меняться в зависимости от вида изнашивания (износ при скольжении, износ при газоабразивной эрозии и т.д.). Однако очень важно, чтобы данные испытаний, влияющие на трибосистему, включались в протокол обязательно. Данные испытаний на износ должны сопровождаться таким детальным описанием, которого было бы достаточно, чтобы читатель (слушатель) смог понять, каким образом они получены. Особое внимание необходимо обращать на размерности, как правило, приводить их в системе СИ.

Компоненты достоверного испытания на износ. В дополнение к общей методологии необходимо иметь в виду некоторые дополнительные условия получения достоверных результатов испытаний: спецификация материала; статическая значимость; свойства поверхности; влияние пути скольжения; окружающая среда; измерение износа и трения; регистрация потерь в трибосистеме.

Спецификация материала. Для металлических образцов важно знать не только химический состав, вид термообработки, микроструктурные особенности и твердость, но и другие особенности материала, которые могут повлиять на износостойкость, например, ориентацию зерен, способ получения заготовки, метод обработки образца и т. д. Эти особенности должны быть отражены в спецификации материала. Для полимерных материалов очень важно иметь информацию о технологии изготовления образцов, их очистке перед испытанием. Поскольку полимеры и эластомеры адсорбируют влагу, полезно выдерживать испытуемые образцы в лабораторной атмосфере в течение суток до испытаний.

Статистическая значимость. Большинство испытаний на износ требуют дорогостоящих образцов и точных измерений. Чтобы уменьшить число повторных испытаний и определить значимость корреляции между характеристиками, может быть использован факторный анализ [45]. Другой простой путь определения, есть ли статическое различие между результатами испытаний, –

это использование диапазонов погрешностей, составляющих плюс-минус три средних квадратических отклонений от среднего арифметического значения величины. Если диапазоны погрешностей для данных образцов не перекрываются, то можно быть уверенным в статической достоверности данных. Необходимо проводить столько повторных опытов, сколько позволит бюджет, применяя к полученным данным статистику.

Свойства поверхности. Финишная обработка поверхности образцов влияет на данные по износостойкости. Для полимерных материалов и эластомеров информацию о финишной обработке можно получить через пресс-форму для изготовления образцов. Как минимум, необходимы данные о шероховатости R_a и R_z и направлении следов обработки.

Влияние длительности и пути скольжения. В большинстве процессов изнашивания их скорость нелинейная. Идеальное испытание на износ должно длиться достаточно долго, чтобы закончились приработочные эффекты и наступил стационарный режим с установившейся скоростью изнашивания. Но это в большинстве случаев неприемлемо, так как дорого. Для этого очень часто предусматривают в одном опыте испытывать несколько одинаковых образцов. Если равновесная скорость изнашивания всех образцов устанавливается после 1 часа испытаний, то это характерное время может быть использовано при выполнении большого числа опытов.

Измерение износа и трения. Выводы по результатам триботехнических испытаний обычно основываются на измерении силы трения и величины износа. Ценность испытаний зависит от точности этих измерений. Измерение силы трения и износа – вероятно, самая ответственная часть испытаний. Обычно время испытаний мало в сравнении с ожидаемой длительностью работы реальной трибосистемы. Количество изношенного материала и степень раз-

рушений, как правило, малы в сравнении с массой и размером испытываемых образцов. И все же взвешивание до и после испытаний образцов – наиболее распространенный способ измерения износа. Однако степень точности измерения зависит и от общего изношенного объема материала. Так, если при изнашивании грубодисперсным абразивом точность, достигаемая на аналитических весах, вполне достаточна, то при усталостном износе в условиях полирования или смятия поверхности образца обеспечить достаточную точность весьма нелегко. Сложно оценить величину износа и резиновых образцов из-за незначительности изнашиваемой массы образца.

При гидроабразивном изнашивании резиновых образцов можно получить прибавку к первоначальной массе, если не учесть набухаемость резины в воде и забиваемость поверхности резины мелкими осколками абразива. В этом случае лучше выдерживать резиновые образцы после испытаний в лабораторных условиях, затем после высыхания обдуть поверхность чистым воздухом для удаления абразива с поверхности и лишь после этого взвешивать. То же самое следует делать и до испытания на износ.

Практика проведения экспериментальных исследований показывает, что универсальным подходом является принцип регистрации износа в единицах объема изношенного вещества, отнесенных к пути скольжения или к массе абразива, затраченного на износ образца при газо- или гидроабразивном изнашивании.

Многие испытательные машины позволяют измерять силу трения различными методами. Однако в некоторых случаях, например, при задире и на ранних стадиях адгезионного изнашивания, сила трения может служить важным индикатором хода процесса, но не всегда эта закономерность выполняется, и коэффициент трения однозначно определяет износ. В частности, при трении

двух цементированных материалов в тяжелых условиях износ может быть незначительным, а коэффициент трения – очень высоким.

Другое обстоятельство, которое необходимо учитывать при измерении силы трения, – присутствие упругой постоянной в системе измерения, которая связана с усилием деформации механических частей системы. Статическое трение и предварительное смещение может быть инерциальным откликом измерительной системы в трибосопряжении. Поэтому наилучшим представлением данных по трению будет запись коэффициента трения в функции условий испытания и пути скольжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
2. **Бараян А.Г., Пенкин Н.С.** Процесс изнашивания серповидных ножей куттеров с применением модельной массы // Северо-Кавказский гос. технич. ун-т.: сб. науч. тр. Сер. Естественнонаучная. № 2. Ставрополь, 1999. С. 4–8.
3. **Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин К.Н.** Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М.: Машиностроение, 1991. 208 с.
4. **Беркович И.И., Громаковский Д.Г.** Трибология, физические основы, механика и технические приложения: учеб. для вузов / под ред. Д.Г. Громаковского. Самара, 2000. 268 с.
5. **Биргер И.А., Шофф Б.Ф., Иосилевич Г.Б.** Расчет на прочность деталей машин: справочник / изд. 4-е перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
6. **Боуден Ф.П., Гейбор Д.** Трение и смазка твердых тел / под ред. И.В. Крагельского. М.: Машиностроение, 1968. 549 с.
7. **Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В.** Моделирование трения и изнашивания. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
8. **Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В.** Трение и изнашивание в машинах. М.: Машиностроение, 1982. 190 с.
9. **Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г.** Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
10. **Веников В.А., Веников Г.В.** Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1984. 439 с.
11. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника (износ и безызносность): учеб. М.: Изд-во МСХА, 2001. 616 с.
12. **Джост П.** Мировые достижения в области трибологии / АН Белоруссии // Трение и износ. Т. 8. № 8. 1987. С. 5–24.
13. **Донченко А.С., Донченко В.А.** Справочник механика рудообогатительной фабрики. М.: Недра, 1975. 559 с.
14. **Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н.** Трение и износ в экстремальных условиях: справочник. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
15. **Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Бобылев Ю.А.** К расчету на износ тихоходных зубчатых передач // Вестник машиностроения. 1985. № 9. С. 53–55.
16. **Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И.** Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228 с.

17. **Иванова В.С., Гуревич С.Е., Коптев И.М.** Усталость и хрупкость металлических материалов. М.: Наука, 1968. 216 с.
18. **Кильчевский Н.А.** Теория соударения твердых тел. М.-Л.: Гостехиздат, 1949. 254 с.
19. **Клейс И. Р., Уумыс Х. Г.** Износостойкость элементов измельчателей ударного действия. М.: Машиностроение, 1986. 167 с.
20. **Когаев В.П., Дроздов Ю.Н.** Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
21. **Козырев С.П.** Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1971. 239 с.
22. **Коровчинский М.В.** Основы теории термического контакта при локальном трении / Новое в теории трения. М.: Наука, 1966. С. 98–145.
23. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 479 с.
24. **Крагельский И.В., Михин Н.М.** Узлы трения машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
25. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.** Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
26. **Матвеевский Р.М., Лашхи В.Л., Буяновский И.А.** и др. Смазочные материалы: справочник. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.
27. **Машиностроение.** Энциклопедия в сорока томах / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка Т. IV-1 / Д.Н. Решетов, А.П. Гусенков, Ю.Н. Дроздов; под общ. ред. Д.Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1995. 864 с.
28. **Машков Ю.К.** Трибология конструкционных материалов. Омск: ОмГТУ, 1996. 99 с.
29. **Мур Д.** Основы и применение трибоники. М.: Мир, 1978. 489 с.
30. **Основы трибологии (трение, износ и смазка): учебн.** / под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Центр "Наука и техника", 1995. 778 с.
31. **Павлов В.Г.** Основы трения и изнашивания: учеб. пособие / Моск. гос. ун-т путей сообщения (МГУПТ). М.: разд. I – 1993, разд. II – 1994, разд. III – 1995.
32. **Пенкин Н.С.** Гуммированные детали машин. М.: Машиностроение, 1977. 280 с.
33. **Пенкин Н.С.** Энергетический подход к оценке износостойкости высокоэластичных материалов в потоке твердых частиц // Трение и износ. Т. 2, № 3, 1981, С. 455–466.
34. **Пенкин Н.С., Маслаков А.Г.** и др. Энергетический метод расчета интенсивности изнашивания резиновых футеровок шаровых мельниц /

- Доклад 1-й Всесоюзной конференции "Проблемы повышения износостойкости и снижения металлоемкости промышленного оборудования методом гуммирования". Ставрополь, 1981. С. 36–39.
35. **Повышение износостойкости горнообогатительного оборудования / Пенкин Н.С., Капралов Е.П.** и др.; под ред. Н.С. Пенкина. М.: Недра, 1992.
 36. **Рабинович А.Ш.** Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почвообрабатывающие детали машин. М.: ГОСНИТИ, 1962. 106 с.
 37. **Решетов Д.Н.** Детали машин. М.: Машиностроение, 1989. 476 с.
 38. **Силин А.А.** Трение и его роль в развитии техники. М.: Наука, 1976. 174 с.
 39. **Смирнов В.В., Дунин-Барковский И.В.** Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1969. 512 с.
 40. **Справочник по триботехнике.** В 3 т. Том 1. Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1989. 400 с.
 41. **Тененбаум М.М.** Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 271 с.
 42. **Тетельбаум Н.М., Тетельбаум Я.И.** Модели прямой аналогии. М.: Наука, 1979. 384 с.
 43. **Трение, изнашивание и смазка: справочник / под ред. И.В. Крагельского, В. В. Алисина.** М.: Машиностроение. Т. 1. 1978. 400 с. Т. 2. 1979. 358 с.
 44. **Трибология.** Исследования и приложения: Опыт США и стран СНГ / под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. М.: Машиностроение, 1993. 454 с.
 45. **Хрущов М.М., Бабичев М.А.** Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. – 252 с.
 46. **Чернавский С.А.** Подшипники скольжения. М.: Машгиз, 1963. 242 с.
 47. **Чихос Х.** Системный анализ в триботехнике. М.: Мир, 1990. 351 с.

УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Пенкин Николай Семенович
Пенкин Александр Николаевич
Сербин Виктор Михайлович

ОСНОВЫ ТРИБОЛОГИИ И ТРИБОТЕХНИКИ

Редактор *Е.М. Нурждина*
Переплет художника *Т.Н. Галицына*
Корректор *М.Я. Барская*
Инженер по компьютерному
макетированию *Н.И. Смольянина*

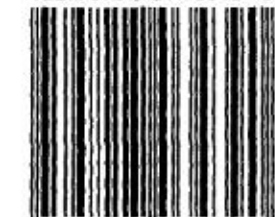
Сдано в набор 22.05.2008 г. Подписано в печать 30.07.2008 г. Формат 60 × 88 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 12,74. Уч.-изд. л. 12,56.
Тираж 500 экз. Заказ 1354

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство "Машиностроение",
107076, Москва, Стромьинский пер., 4. www.mashin.ru

Оригинал-макет изготовлен в ООО "Издательство Машиностроение"

Отпечатано в ГУП ППП "Типография "Наука" РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-217-03437-6



9 785217 034376