

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Е. И. Кордикова

ТРИБОТЕХНИКА

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
(ЭЛЕКТРОННЫЙ ВАРИАНТ)**

Минск 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	
ТРИБОЛОГИЯ И ЕЕ РАЗВИТИЕ	6
Краткая историческая справка.....	6
Разделы трибологии.....	7
Основные понятия и определения.....	9
Роль трения в технике.....	9
ФАКТОРЫ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.....	12
Структура вещества	12
Свойства твердых тел	14
Деформация кристаллических тел	17
Адсорбция и хемосорбция.....	18
Оксиды на металлах	19
Адгезия между твердыми телами.....	20
Взаимодействие тел при трении.....	22
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ	24
Типы поверхностей контакта.....	24
Макрогеометрические отклонения.....	25
Микрогеометрия поверхности.....	26
Параметры шероховатости.....	27
Изменения поверхности при трении.....	29
Методы оценки топографии поверхности.....	30
<i>Методы измерения волнистости.....</i>	30
<i>Методы измерения шероховатости.....</i>	31
ПЛОЩАДИ КОНТАКТА И ПЯТНА КОНТАКТА	35
Площади контакта и давления на контакте.....	35
Расчет фактической площади контакта и деформации.....	37
Методы измерения фактической площади контакта.....	42
ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ТРЕНИИ.....	44
Основные тепловые показатели и их расчет.....	44
Температура на поверхности контакта	45
Расчет температур на скользящем контакте	46
Факторы, влияющие на температуру пятен контакта	50
Сварка металлов трением.....	50
Методы измерения температуры в зоне контакта.....	51
ПРИРОДА И ВИДЫ ТРЕНИЯ.....	53

Классификация видов трения	53
ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ СМАЗКИ	56
Основные понятия.....	56
Коэффициент трения	57
Виды контакта при трении	62
Факторы, влияющие на коэффициент трения	64
ТРЕНИЕ ПРИ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКЕ	68
Формирование граничных слоев	68
Свойства граничных слоев	69
Механизм трения.....	70
Влияние параметров	71
ЖИДКОСТНОЕ ТРЕНИЕ	75
Гидростатическая смазка.....	76
Гидродинамическая смазка.....	77
Эластогидродинамическая смазка.....	80
Влияние параметров на гидродинамическое трение.....	82
ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ	85
Природа трения качения.....	86
Факторы, влияющие на сопротивление качению	90
ИЗНАШИВАНИЕ ТРУЩИХСЯ ТЕЛ	93
Основные понятия о механизме изнашивания пар трения	93
Классификации видов изнашивания	94
ХАРАКТЕРИСТИКА ВИДОВ ИЗНАШИВАНИЯ	96
Абразивное изнашивание	96
<i>Изнашивание о закрепленный абразив</i>	96
<i>Изнашивание в абразивной прослойке</i>	97
<i>Изнашивание в абразивной массе</i>	98
<i>Изнашивание при ударе по абразиву</i>	99
<i>Газоабразивное изнашивание</i>	99
<i>Гидроабразивное изнашивание</i>	100
Усталостное изнашивание.....	101
Кавитационное изнашивание.....	102
Адгезионное (молекулярно-механическое) изнашивание	104
Эрозионное изнашивание.....	105
Окислительное изнашивание	106
Водородное изнашивание	107
Фреттинг-коррозия.....	108
Электроэрозионное изнашивание	109
Избирательный перенос. Эффект безызносности.....	109
МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ	

МАШИНЫ.....	110
Кинетика изнашивания трибосистем	110
Способы повышения износостойкости.....	112
Конструкционные способы повышения износостойкости	112
<i>Выбор материала.....</i>	112
<i>Оптимизация макрогеометрии поверхностей трения.</i>	113
<i>Выбор наиболее оптимальной схемы машины.</i>	114
<i>Замена внешнего трения на внутреннее трение.....</i>	114
<i>Рациональный выбор вида трения.</i>	114
<i>Снижение тепловой нагруженности контакта.</i>	115
Технологические способы повышения износостойкости детали	115
<i>Формирование оптимальной топографии.....</i>	115
<i>Нанесение защитных покрытий.</i>	116
<i>Облучение потоками энергии высокой плотности.....</i>	116
<i>Химико-термическая обработка поверхности.</i>	117
<i>Наплавка износостойких слоев.....</i>	118
<i>Напыление покрытий из порошковых материалов.....</i>	118
<i>Механическое упрочнение поверхностей.....</i>	118
Материаловедческие способы повышения износостойкости.....	119
<i>Оптимизация макроструктуры материалов.</i>	119
<i>Управление микроструктурой материалов.....</i>	120
Эксплуатационные способы повышения износостойкости.....	120
<i>Обкатка машин и механизмов.....</i>	120
<i>Организация смазки узлов трения.....</i>	120
<i>Выбор режимов эксплуатации.</i>	121
<i>Диагностика и ремонт узлов трения.</i>	121
МАТЕРИАЛЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	123
Классификация триботехнических материалов	124
Антифрикционные материалы.....	125
<i>Металлические антифрикционные материалы</i>	126
<i>Природные антифрикционные материалы</i>	127
<i>Полимерные антифрикционные материалы</i>	127
<i>Термопластичные материалы.....</i>	128
<i>Термореактивные полимеры.....</i>	134
<i>Самосмазывающиеся полимерные композиционные материалы.....</i>	138
<i>Металлокерамические антифрикционные материалы</i>	140
<i>Антифрикционные покрытия.....</i>	143
Фрикционные материалы.	143
<i>Виды фрикционных материалов.....</i>	144
<i>Металлические фрикционные материалы</i>	144

<i>Асбестовые материалы</i>	145
<i>Органические фрикционные материалы</i>	146
Смазочные материалы	146
<i>Жидкие смазки</i>	148
<i>Пластичные (консистентные) смазочные материалы</i>	149
<i>Твердые смазочные материалы</i>	150

ТРИБОЛОГИЯ И ЕЕ РАЗВИТИЕ

Краткая историческая справка

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 профессора *П. Джоста*.

Трибология – наука, изучающая вопросы, связанные с трением, изнашиванием и смазкой поверхностей при их относительном перемещении.

Вопросами трения занимались люди с древних времен.

Ценный вклад в изучение трения в *XV* веке внес *Леонардо да Винчи (1452–1519)*. Он обосновал невозможность создания вечного двигателя, одной из причин которой считал трение. Леонардо да Винчи впервые ввел понятие коэффициента трения как отношение силы трения к нормальной нагрузке; показал, что сила трения зависит от материала трущихся поверхностей, качества их обработки; изобрел роликовый и шариковый подшипники. Итальянский ученый изобрел первый трибометр, разработал состав легкоплавкого сплава для поверхностей трения. Работы Леонардо базировались на механической теории, согласно которой предполагалось, что при трении происходит механическое зацепление неровностей поверхности. Открытия Леонардо не нашли применения в свое время, были забыты и вновь открыты другими учеными спустя столетия.

Формирование науки о трении началось под влиянием запросов практики. В работах *Г. Галилея, И. Ньютона, Амонтона, Ш. Кулона, Л. Эйлера, М. В. Ломоносова, Д. И. Менделеева, Н. Е. Жуковского, Н. П. Петрова, О. Рейнольдса* и других ученых в *XX* веке были установлены основные закономерности трибологии.

Систематические исследования трибологических вопросов начались с 20-х годов *XX* столетия. *П. А. Ребиндером* был открыт эффект адсорбционного понижения прочности, позднее на основе исследования межмолекулярного взаимодействия *Б. В. Дерягиным* была предложена теория трения. Дальнейшие исследования механизмов трения позволили *И. В. Крагельскому* практически одновременно с английскими исследователями *Ф. Боуденом* и *Д. Тейбором* сформулировать адгезионно-деформационную теорию трения, которая определила дальнейшее развитие трибологии.

В тоже время начали свои работы по исследованию граничного трения А. С. Ахматов и В. Гарди, а М. М. Хрущевым заложены основы исследования абразивного изнашивания.

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.

К 60-м годам трибология сформировалась как единая научная дисциплина, имеющая самостоятельные области исследования, такие как контактная механика трения, материаловедение, теория смазки, контактная гидродинамика, теория изнашивания.

В наше время 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. Со рокин, 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.

Разделы трибологии

Трибология, как наука, имеет научно-технические разделы, в настоящее время основные направления в области трибологии следующие:

Трибоанализ – основной раздел трибологии. Накопление и систематизация научной информации о фундаментальных закономерностях фрикционных процессов, а также построение моделей этих процессов.

Трибоматериаловедение – исследование строения и свойств триботехнических материалов. Изучает связь между составом, строением, свойствами и закономерностями поведения материалов, а также их изменениями при трении и изнашивании. Трибоматериаловедение служит связующим звеном между трибоанализом и триботехникой с триботехнологией.

Триботехнология – изучение процессов формообразования деталей и разработка технологических процессов получения требуемых триботехнических характеристик поверхностей трения.

Трибометрия – раздел трибологии о методах испытаний и средствах измерения основных параметров фрикционного контакта.

Трибодиагностика – раздел трибологии о совокупности методов и средств непрерывного контроля состояния фрикционных параметров деталей и узлов машин.

Триботехника – конечная стадия процесса создания узлов трения, аккумулирующая новейшие достижения трибоанализа, трибоматериаловедения, триботехнологии. Принципы триботехники реализуются в методах расчета и конструирования узлов трения.

Трибоинформатика – раздел трибологии о закономерностях получения трибологической информации, ее преобразования, хранения и передачи для использования в науке, образовании и производстве.

В последние годы в трибологии получили развитие новые разделы: трибохимия, трибофизика, трибомеханика и трибобиомеханика.

Трибохимия – изучает воздействие контактирующих поверхностей с химически активной средой. Она исследует проблемы коррозии при трении, химические основы избирательного переноса и взаимодействия на поверхность деталей химически активных веществ, образующихся при трении вследствие деструкции полимеров или смазочного материала.

Трибофизика – это направление современной физики, изучающее процессы и явления, происходящие в реальных системах тел, где тела контактируют друг с другом в условиях взаимного перемещения.

Трибомеханика – изучает механику взаимодействия контактирующих поверхностей при трении. Она рассматривает законы рассеяния энергии, импульса, а также механическое подобие, релаксационные колебания при трении, реверсивное трение, уравнения гидродинамики и др. применительно к задачам трения, изнашивания и смазывания.

Трибобиомеханика – изучает механику биологических систем при контактном их взаимодействии при трении.

Основные понятия и определения

Более 98 терминов, относящихся к трению и износу, стандартизированы 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.

Роль трения в технике.

Трение – удивительный феномен природы. 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.

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.

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. 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.

Большие материальные потери народное хозяйство терпит от повышенного трения *в узлах машин*. Известно, что более половины топлива, потребляемого автомобилями, тепловозами и другими видами транспорта, расходуется на преодоление сопротивления, создаваемого трением в подвижных сочленениях. Низкие значения коэффициента полезного действия (КПД) многих машин обусловлены главным образом большими потерями на трение.

С трением связана еще одна из самых острых проблем современности – *износ* машин и механизмов. Наиболее распространенной причиной выхода деталей и рабочих органов машин из строя является не поломка, а износ или повреждение рабочих поверхностей. Действуя постепенно и почти незаметно для глаза, изнашивание приводит машину или прибор к такому состоянию, что дальнейшее их использование становится нерациональным или даже опасным.

Особенно велик износ деталей и рабочих органов машин, которые эксплуатируются в абразивных и агрессивных средах. Одной из главных причин износных отказов является износ подвижных сопряжений машин – *трибосопряжений*.

Трибосопряжение (ТС) – две функционально связанные детали (вал–втулка, два зубчатых колеса и др.).

Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в несколько раз превышают ее стоимость: для автомобилей в 6 раз; для самолетов до 5 раз; для металлорежущих станков до 8 раз.

Потери средств в промышленности развитых стран вследствие трения и сопутствующего износа машин и механизмов составляют 4–5% и более процентов национального дохода.

Значительно менее заметна, хотя и чрезвычайно важна, *полезная роль* трения. Моделью такой ситуации является гололед. Небольшой морозец после оттепели или дождя приводит к неожиданным последствиям из-за того, что трение лишь частично исчезло. Еще более неприятен и опасен для водителей отказ тормозов, в котором трение играет полезную роль.

Одной из важнейших *проблем* трибологии является проблема повышения износостойкости конструкционных материалов, составляющих трибосопряжения и узлы трения, именно поэтому наряду с улучшением антифрикционных характеристик, снижение износа относится к приоритетным инженерным задачам.

Методы расчетов на износостойкость пока еще несовершенны и порой для многих деталей отсутствуют.

Концепции конструирования в современной технике часто требуют, чтобы проектируемый материал сочетал в себе противоречивые свойства, например, высокий коэффициент трения и низкую интенсивность изнашивания, высокую механическую прочность и значительную податливость, высокую прочность при низкой плотности и т.п. Для систем, работающих в экстремальных условиях необходимы материалы с особыми свойствами (коррозионно-, температурно-, радиационноустойчивые).

В настоящее время стало очевидным, что вопросы повышения износостойкости деталей трибосопряжений должны проводиться в тесной кооперации конструкторских, технологических и триботехнических решений.

ФАКТОРЫ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Кратко рассмотрим явления, факторы и поверхностные явления твердых тел, оказывающие влияние на трибологические процессы.

Структура вещества

Различают две разновидности твердых тел, отличающихся своими свойствами – кристаллические и аморфные.

Кристаллические тела при нагреве остаются твердыми до определенной температуры, при которой они переходят в жидкое состояние.

Аморфные тела при нагреве размягчаются. Размягчение происходит в широком интервале температур. При этом тела становятся вязкими и дальнейший их нагрев сопровождается переходом в жидкое состояние.

Кристаллические тела характеризуются упорядоченным расположением в пространстве элементарных частиц, из которых они состоят – так называемая *кристаллическая решетка*.

Несмотря на многообразие кристаллических решеток, большинство твердых тел имеет решетку трех типов: объемноцентрированную кубическую, гранецентрированную кубическую, гексагональную плотноупакованную (рис. 1).

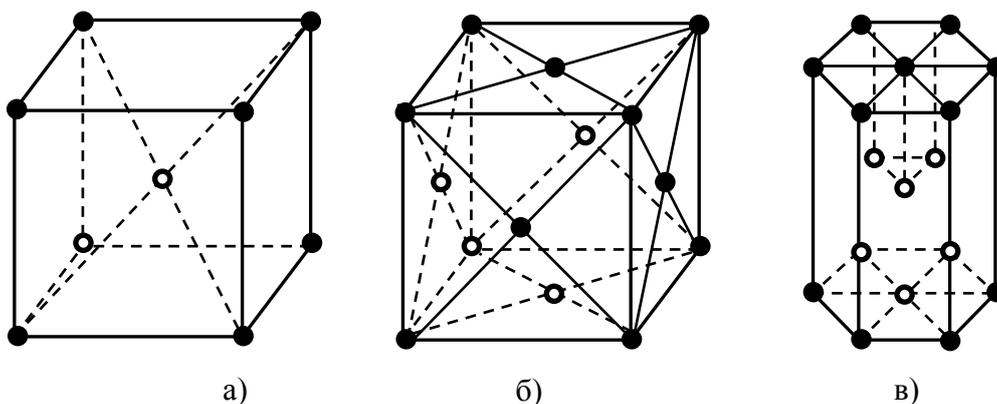


Рис. 1. Основные типы кристаллических решеток металлов:
а – кубическая объемноцентрированная, б – кубическая гранецентрированная,
в – гексагональная плотноупакованная

Аморфные тела характеризуются хаотичным расположением элементарных частиц.

Металлы – поликристаллические тела, состоящие из большого количества зерен, в пределах одного зерна сохраняется правильная кристаллическая решетка. Из-за хаотического расположения зерен поликристаллы изотропны, а свойства любой поверхности поликристалла в среднем одинаковы.

В технике широко применяются сплавы металлов. Они имеют характерные свойства, присущие металлическому состоянию.

Свойства реальных кристаллов отличаются от свойств идеальных. Главной причиной значительного снижения прочности и текучести кристаллов являются дефекты их структуры (вакансии, внедренные инородные атомы, дислокации).

Особое место в строении металлов занимают границы зерен. Материал на этих участках находится в ослабленном состоянии вследствие повышенной концентрации отмеченных выше дефектов.

Поры и трещины формируют в металлах развитую микрокапиллярную сеть, которая начинается на поверхности в виде системы микроскопических и субмикроскопических 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.

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 (рис. 2, а) имеют линейные молекулы, связанные между собой силами Ван-дер-Ваальса.

Если в основной цепи макромолекулы возникают короткие боковые ответвления, то такие полимеры называют *разветвленными* (рис. 2, б). При повышении температуры полимеры линейного и разветвленного строения легко размягчаются и переходят в жидкое состояние, причем изменение их свойств происходит постепенно. При комнатной температуре структура линейных полимеров полностью аморфная, или частично кристаллическая. Линейные полимеры являются основой термопластов, которые легко обрабатываются давлени-

ем при температурах до 200...300 °С. К термопластам относятся фторопласты, поливинилхлорид, полиэтилен, полистирол и др.

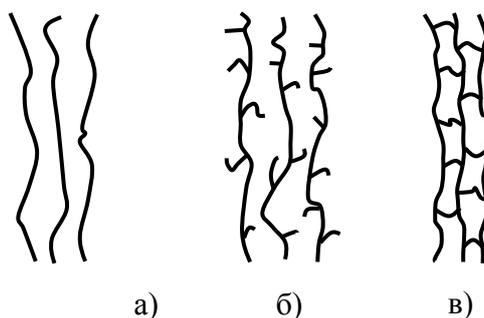


Рис. 2. Строение полимеров:
а – линейных, б – разветвленных, в – пространственных

Полимеры с замкнутой *пространственной* сетчатой структурой (рис. 2, в) составляют основу терморезистивных полимеров (фенолформальдегидные смолы, карболит, этрол и другие сильнонаполненные полимеры). Цепи макромолекул в пространственных полимерах сшиты между собой химическими связями, что повышает их свойства по сравнению с линейными и разветвленными.

Свойства 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.

Твердость НВ определяется по методу вдавливания шарика (метод Бринелля), микротвердость определяется при вдавливании в материал алмазной пирамиды.

Между числом твердости по Бринеллю НВ и величиной предела прочности сталей при разрыве σ_b существует приближенная эмпирическая зависимость:

$$\sigma_{\epsilon} \approx 0,36 \cdot HB.$$

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.

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

При трении или механической обработке поверхностный слой твердого тела подвергается интенсивному деформированию, насыщается элементами материала контртела и окружающей среды. Это приводит к изменению его структуры и обуславливает неоднородность его строения по глубине.

Примерная структура *поверхностного слоя металла* детали после внешнего трения одной детали относительно второй представлена на рис. 3.

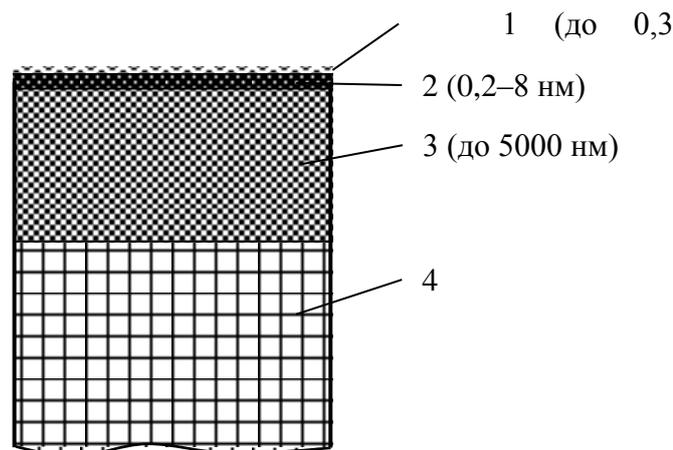


Рис. 3. Структура поверхностного слоя металла детали:

- 1 – адсорбированный слой, состоящий из пленок влаги, газов и загрязнений;
- 2 – слой оксида, имеющий повышенную твердость;
- 3 – слой с сильно деформированной кристаллической решеткой;
- 4 – металл с исходной структурой

Граничный слой 1 толщиной до 3 нм состоит из адсорбированных молекул газов, влаги, смазочного материала. Удаляется с поверхности детали нагревом в вакууме. Слой 2 состоит из оксидов, образовавшихся при взаимодействии металла с кислородом. Он содержит продукты трибохимических реакций, сильно деформированные частицы метал-

ла. Для него характерна высокая концентрация пор и микротрещин. Толщина слоя составляет 0,2–8 нм. Слой 3 состоит из сильно деформированных кристаллов металла, подвергнутых воздействию температуры и механических нагрузок, что приводит к повышению пределов прочности, текучести и микротвердости. Толщина слоя 3 достигает 5000 нм. Нижележащий слой 4 имеет структуру исходного материала. Толщина каждого из слоев зависит от режимов нагружения материала при трении. Все это на определенной глубине придает металлу структурно-неустойчивое состояние.

При фрикционном нагружении *полимерного материала* его поверхностный слой претерпевает ряд структурных изменений, которые обеспечивают различие свойств полимера по глубине. В результате деформирования и импульсного нагрева при трении происходит деструкция молекулярных цепей, сопровождающаяся выделением газообразной фазы. Изменяется фазовый состав, измельчаются надмолекулярные структуры и кристаллические области, происходит локальная аморфизация кристаллического полимера. Наблюдается ориентация структуры в направлении действия сил трения. Схематично структура поверхностного слоя, образовавшаяся при трении, представлена на рис. 4.

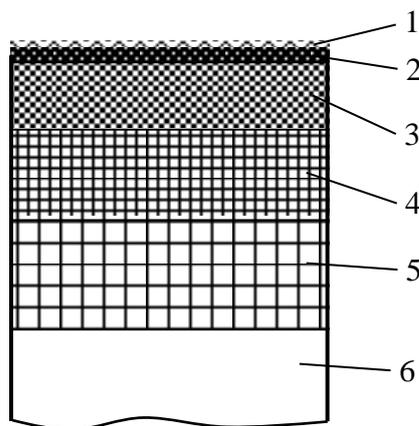


Рис. 4. Структура поверхностного слоя полимера:

- 1 – газообразная фаза; 2 – адсорбционный слой; 3 – низкомолекулярные продукты разложения полимера; 4 – слой с сильно ориентированной структурой; 5 – слой со слабо ориентированной структурой; 6 – основной материал

В результате деструкции молекулярных цепей при трении на поверхности полимера появляется газообразная фаза 1, состоящая из молекул окружающей среды и газов, образующихся при разложении полимера. Ниже располагается адсорбционный слой 2. Область 3 представляет собой слой, состоящий преимущественно из низкомоле-

кулярных продуктов разложения полимера, обладающий низким сопротивлением сдвигу. Слой 4 состоит из ориентированных в направлении сдвига макромолекул и надмолекулярных образований. Слой 5 характеризуется наличием частично разрушенных надмолекулярных образований и кристаллических областей, слабо ориентированных в направлении действия сдвигающей силы (силы трения). Физико-механические свойства каждого из слоев различны и могут существенно отличаться от свойств основного материала (6).

Структура поверхностных слоев твердых тел зависит от режимов нагружения и может отличаться от приведенной. Разделение твердого тела на слои является условным. В реальных деталях наблюдается плавное изменение структуры по нормали к поверхности трения.

Деформация кристаллических тел

Под деформацией понимают изменение размеров и формы тела под воздействием приложенных сил. Различают упругую и пластическую деформации.

В монокристалле или отдельном кристалле под действием внешних сил атомы исходной кристаллической решетки смещаются относительно своего первоначального расположения. Если это смещение мало и не превышает половины расстояния между атомами, то после устранения внешней нагрузки атомы вновь занимают первоначальное положение, размеры кристалла восстанавливаются. В данном случае имеет место *упругая деформация*.

Пластическая деформация происходит в результате смещения одних атомов относительно других на целое число межатомных расстояний. После снятия нагрузки смещенный атом не возвращается, т.к. перестал взаимодействовать с соседним атомом. При таком механизме пластической деформации происходит скольжение атомных плоскостей кристаллов друг относительно друга. Сопротивление кристалла пластической деформации велико, т.к. необходимо одновременное смещение всех атомов, лежащих в плоскости скольжения.

В реальных *металлах* действует дислокационный механизм пластической деформации. Переход атомов в соседнее устойчивое положение в этом случае происходит с местным искажением структуры, называемыми дислокациями и распространяющимися по плоскости скольжения подобно волне.

Упругие деформации *кристаллических полимеров* обусловлены изменениями валентных углов полимерной цепи и изменением меж-

атомных и межмолекулярных расстояний и могут достигать нескольких процентов, в отличие от металлов. Пластические деформации полимеров являются результатом необратимого перемещения макромолекул или их агрегатов относительно друг друга.

Деформационные свойства *аморфных полимеров* чувствительны к изменению температуры. До температуры стеклования полимер находится в стеклообразном состоянии и в нем возникают только упругие деформации. Выше температуры стеклования некоторые полимеры могут испытывать обратимые высокоэластические деформации, обусловленные конформационными изменениями молекулярных цепей (распрямлением). При достижении температуры текучести в полимере возникают необратимые пластические деформации за счет перемещения молекулярных цепей друг относительно друга и разрушению слабых межмолекулярных связей.

Адсорбция и хемосорбция

В результате взаимодействия твердого тела с молекулами газа или жидкости, соприкасающихся с твердым телом, поверхность последнего покрывается пленкой веществ, содержащихся в окружающей среде: газов, паров воды, обычно находящихся в воздухе, и паров других жидкостей, а также веществ, растворенных в жидкостях и соприкасающихся с поверхностью твердого тела.

Явления образования на поверхности твердого тела тончайших пленок газов, паров или растворенных веществ, либо поглощение этих веществ поверхностью тела называют *адсорбцией*.

Тело, на котором происходит адсорбция, называют адсорбентом.

При химической адсорбции (хемосорбции) полярные концы молекул, связываясь с поверхностью тела, образуют в ней монослой, сходный с химическим соединением. Подвижность молекул в результате этого значительно уменьшается.

Наибольшей способностью к адсорбции обладают поверхностно активные вещества (ПАВ), молекулы которых ориентируются при адсорбции перпендикулярно к поверхности тела, с которым взаимодействуют (органические кислоты, спирты, смолы, дистиллированная вода). В трибологии роль ПАВ велика, они присутствуют практически во всех видах смазочных материалов и оказывают влияние на механические свойства твердых тел. П. А. Ребиндером был открыт эффект адсорбированного снижения прочности поверхностного слоя твердых тел под воздействием ПАВ жидкой среды.

Внешний адсорбционный эффект (адсорбция ПАВ на внешней поверхности твердого тела) способствует пластифицированию поверхностного слоя. Внутренний адсорбционный эффект (адсорбция ПАВ на внутренних поверхностях раздела – зародышевых микротрещинах) приводит к снижению поверхностной энергии, проявляющейся в возникновении хрупкости и потере прочности.

Наряду с адсорбцией проходят и процессы *диффузии* – распространение вещества в какой-либо среде в направлении убывания его концентрации, обусловленное тепловым движением ионов, атомов, молекул, а также более крупных частиц.

В процессе трения и изнашивания могут иметь место гетеро-, самодиффузия, диффузия в градиенте температур и напряжений, реактивная, объемная и поверхностная диффузия.

Адсорбция и диффузия играют существенную роль в повышении или снижении износа в сопряжениях деталей. Явление *диффузии* используется для термомеханического упрочения поверхности слоев деталей узлов трения за счет их насыщения элементами других веществ (азотирование, цианирование, цементация и т.д.) и получения защитных покрытий. Метод получения антифрикционных деталей из порошков путем спекания также основан на явлении диффузии.

Оксиды на металлах

Процесс трения усиливает процесс окисления. Физико-химические свойства поверхности металла, ее дефекты определяют механизм и глубину реакции поверхностного окисления.

Пленка оксидов, в связи со своей высокой твердостью защищает нижележащие слои металла от механического воздействия. Однако, из-за незначительной толщины оксидных пленок, их защитное действие невелико.

Наличие оксидных пленок снижает молекулярно-адгезионное взаимодействие между трущимися поверхностями металлов.

Окисление связано с образованием оксида при протекании химической адсорбции атомов кислорода воздуха с металлической поверхностью. Затем происходит образование кристаллической фазы оксидов. Различия в постоянной кристаллической решетке оксида и металла способствуют тому, что пленки оксидов находятся в сжатом состоянии. Это сжатое состояние снижает дальнейшее проникновение кислорода к металлу.

Присутствие воды и находящихся в воздухе газов CO_2 и SO_4 создают условия для протекания электролитического окисления.

Защитная роль пленки оксида связана с твердостью оксида и основного металла. Максимальная несущая способность оксидной пленки связана с твердостью основного металла. Чем меньше разница между твердостью основного металла и оксида, тем выше прочность пленки.

В начале процесса окисления пленки обладают большой прочностью и защищают материал от схватывания. Дальнейший рост толщины пленки приводит к уменьшению ее прочности и под действием внешних сил трения она легко отделяется.

Основное назначение оксидных пленок – предотвращение образования металлических связей и замена их межмолекулярными Ван-дер-Вальсовыми.

Оксидные пленки на трущихся поверхностях приводят к ослаблению схватывания, уменьшению трения и износа.

Кроме пленок оксидов на поверхности твердых тел могут образовываться сульфидные, водяные, полимерные пленки.

Адгезия между твердыми телами.

Трение является следствием действия сил адгезии.

Адгезия – это явление образования соединений между двумя приведенными в контакт разнородными телами.

Преодоление сил адгезии двух взаимоконтактирующих поверхностей тел происходит в момент начала их взаимного перемещения.

Взаимное перемещение элементов структуры тела, вызывающее внутреннее трение, также связано с преодолением сил сцепления между атомами и молекулами структуры. Если силы сцепления действуют внутри тела, то они вызывают *когезию*, если на поверхности – *адгезию*.

Любое воздействие, связанное с отрыванием элементов тел, встречает сопротивление сил когезии. Взаимное перемещение поверхностей твердых тел при их силовом взаимодействии связано с преодолением сил адгезии.

Под действием нормальной нагрузки F_n между двумя телами возникают адгезионные соединения (мостики сварки) в области взаимного внедрения неровностей поверхностей (рис. 5.). При снятии нормальной нагрузки часть соединений разрушается благодаря упругому восстановлению деформированных неровностей.

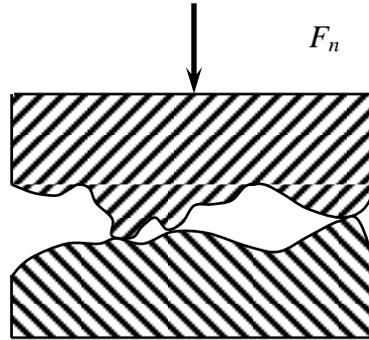


Рис. 5. Схема образования адгезионных соединений при контакте твердых тел

Прочность адгезионного взаимодействия двух реальных тел, как правило, незначительна. Это связано с малым числом и размером площадок, на которых образуются адгезионные связи. Кроме того, оксидные и адсорбционные пленки препятствуют образованию адгезионных соединений.

Разрушение адгезионных связей происходит по месту ее образования (адгезионное разрушение) или на некоторой глубине (когезионное разрушение).

Адгезия наблюдается во многих узлах трения – в зубчатых передачах, опорах скольжения и качения, муфтах, при механической обработке металлов и др.

Единой теории адгезии пока не существует. В настоящее время используют несколько теорий, объясняющих адгезию:

- *механическая теория* – одностороннее или взаимное заклинивание неровностей одного тела в дефектах другого;

- *адсорбционная теория* – между контактирующими телами возникает молекулярное взаимодействие с образованием *водородных, ориентационных, дисперсионных, индукционных связей*;

- *электрическая теория* – образование двойного электрического слоя при переходе электронов или ионов с одной поверхности на другую (в основном в парах полимер металл);

- *диффузионная теория* – адгезия обусловлена взаимным проникновением цепей молекул или их сегментов и возникновением связи между ними – образуется переходная пленка совмещенного состава (адгезия полимеров);

- *рекристаллизационная теория* – миграция атомов через кристаллические решетки (даже через оксидные пленки) с образованием общих кристаллов в области контакта (адгезия металлов).

– *химическая теория* – образование в местах контакта химических связей ковалентного и ионного типа.

Взаимодействие тел при трении.

При относительном перемещении твердых тел в зоне их контакта имеет место сложный комплекс *механических, физических и химических явлений*, приводящих к возникновению сопротивления перемещению и разрушению сопрягаемых поверхностей.

Под действием нормальной нагрузки и сдвигающего усилия в микрообъемах трущихся тел возникают *высокие напряжения*, материал этих объемов испытывает существенные по величине *деформации*, что сопровождается *импульсным нагревом* материала интенсивно деформируемых участков до температуры, соизмеримой с температурой его плавления или деструкции. Это способствует *увеличению скорости* протекания адгезионных, диффузионных, электрических и магнитных процессов в зоне фрикционного контакта.

В результате поверхностные слои трущихся тел становятся *химически и каталитически активными*: металлы насыщаются дислокациями, полимерные материалы – реакционно-способными группами, образующимися при разрыве молекулярных и межмолекулярных связей, интенсифицируются процессы образования граничных слоев и оксидных пленок.

Следствием протекания перечисленных процессов при трении является образование новых «вторичных» структур поверхностных слоев, отличающихся по строению и свойствам от структуры и свойств исходного материала. Наряду с изменением структуры происходит образование, накопление и развитие дефектов, приводящих к разрушению поверхностных слоев трущихся тел.

Природа происходящих процессов при трении различна. Условно их подразделяют на группы: *механические, физические; химические; физико-химические*.

Механический аспект – при взаимодействии твердых тел под нагрузкой возникают напряжения и соответствующие деформации, величина и вид которых зависит от механических свойств контактирующих тел.

Химический аспект – взаимодействие обусловлено образованием между материалами контактирующих тел химических связей (химических соединений).

Химические связи характерны для работы металлополимерных пар, особенно при трении со смазкой. Трибологические процессы приводят к возникновению высокоактивных свободных радикалов (или молекул), которые могут вступать в реакции синтеза с мономерами (как смазки, так и полимеров) или молекулами другого тела. Таким образом, при трении возможно возбуждение химических реакций, приводящих к образованию так называемых "материалов трения", как снижающих, так и увеличивающих коэффициенты трения.

Физический аспект – взаимодействия, ответственные за адгезию и диффузию твердых тел, в частности за адгезионную составляющую сил трения. Адгезионные и диффузионные механизмы имеют самостоятельную классификацию (подробнее ниже);

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Типы поверхностей контакта.

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

Твердые тела не являются идеально гладкими. Поэтому их контакт не бывает сплошным, а реализуется на отдельных участках, суммарная площадь которых незначительна по сравнению с теоретически возможной. Отклонения поверхностей от реальных подразделяют на макро-, микро- и субмикрogeометрического порядка (рис. 6).

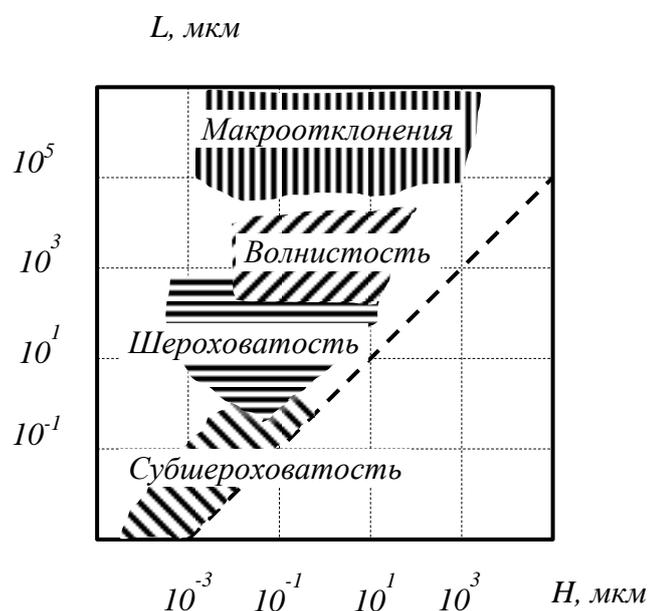


Рис. 6. Соотношение характерных размеров отклонений топографии

Макрогеометрические – отклонения поверхности всей детали или больших ее участков от идеальной.

Макроскопические неровности несут на себе *микронеровности* – наличие на поверхности дефектов в виде трещин, раковин, пиков и впадин, коробления и т.д.

В свою очередь микронеровности имеют *субшероховатость* порядка молекулярных размеров. *Субмикрogeометрические* – дефекты на уровне молекулярной (атомной) структуры: дефекты кристаллической решетки, вакансии и т.д.

Макрогеометрические отклонения.

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 такие *формы макрогеометрических* отклонений цилиндрических поверхностей (рис. 7):

– в продольном направлении – выпуклость, седлообразность, вогнутость, конусность, и т.п.);

– в поперечном направлении – овальность, огранка и т.п.

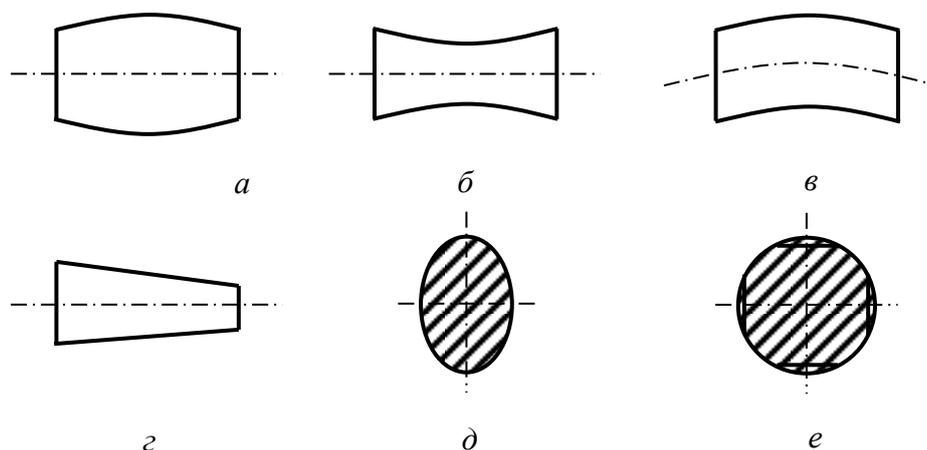


Рис. 7. Виды отклонений форм цилиндрических поверхностей:
a – выпуклость; *б* – седлообразность; *в* – вогнутость; *г* – конусность;
д – овальность; *е* – огранка

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

Макрогеометрические отклонения поверхности всей детали обычно имеют масштаб, измеряемый в диапазоне $10^{-3} - 10^{-4}$ м.

Величина отклонений определяется путем измерения размеров детали в различных сечениях. Эти отклонения (Δ) определяют как наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до идеальной прилегающей поверхности, измеряемые по нормали к последней.

Микрогеометрия поверхности.

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

Макроскопические неровности несут на себе *микронеровности*, измеряемые на уровне $10^{-5} - 10^{-6}$ м.

Микрогеометрия создается в процессе изготовления деталей и характеризуется волнистостью и шероховатостью (рис. 8).

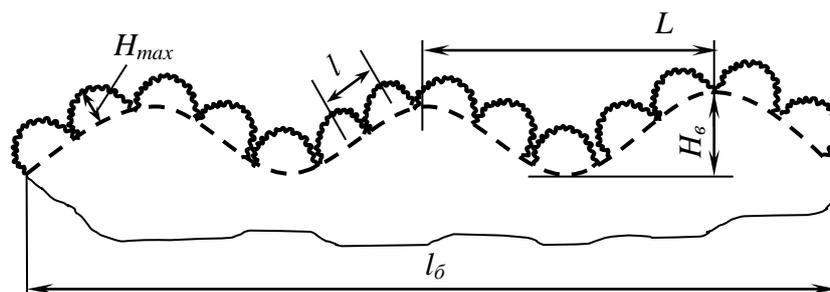


Рис. 8. Схема волнистости и шероховатости поверхности
 L – шаг волны, $H_{в}$ – высота волны, l – шаг шероховатости,
 H_{max} – высота шероховатости, $l_{б}$ – базовая длина

Шаг (L, l) – расстояние между вершинами двух соседних выступов, измеренное на профиле поверхности.

Высота (H) – расстояние между вершиной и впадиной.

Волнистость – это совокупность регулярно повторяющихся неровностей с относительно большим шагом. Обычно отношение

$$\frac{L}{H_{в}} = 50 \dots 1000,$$

где L – шаг волны, $H_{в}$ – 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 $l_{б} = 80 \dots 8000$ мкм и для шероховатостей $\frac{L}{H_{max}} < 50$.

Роль шероховатости особенно важна в подвижных соединениях деталей машин, т.к. оказывает влияние на величину трения и износа трущихся поверхностей, например, подшипника, направляющих, ползунов и т.п.

Шероховатость обработанной поверхности является следствием пластической деформации поверхностного слоя детали при образовании стружки, копирования неровностей режущих кромок инструмента, трения о деталь и др.

Шероховатость поверхности определяют по её *профилю*, который образуется в сечении этой поверхности плоскостью, перпендикулярной к номинальной поверхности, графическое представление профиля называют *профилограммой*.

Основной задачей при исследовании шероховатости поверхности, является определение ее параметров.

Параметры шероховатости

Шероховатость определяется на *базовой длине*, которую выбирают таким образом, чтобы не проявились другие виды неровностей (макронеровности), однако должна быть большой для увеличения точности оценки (рис. 9).

Средняя линия профиля – среднее квадратичное отклонение профиля от нее должно быть минимальным.

Линия выступов – эквидистанты средней линии и проходит через наивысшую точку профиля.

Линия впадин – эквидистанты средней линии и проходит через низшую точку профиля.

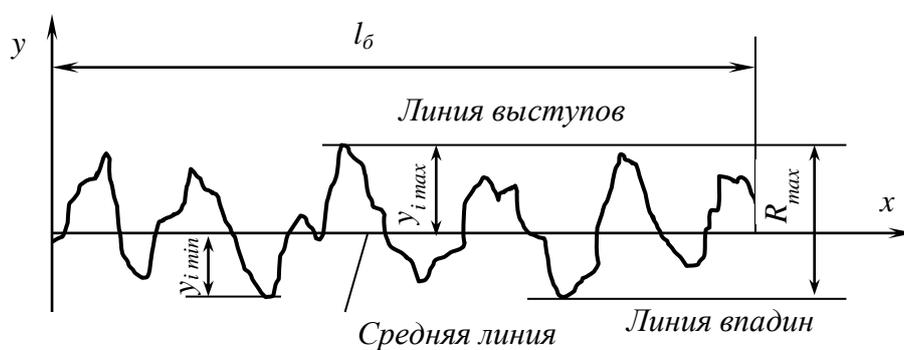


Рис. 9. Профилограмма шероховатой поверхности

Шероховатость поверхности характеризуется средним арифметическим отклонением профиля от средней линии R_a и высотой неровностей R_z .

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a (0,008–100 мкм) – определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонения профиля от средней линии в пределах базовой длины.

Среднее арифметическое отклонение профиля рассчитывают по формуле:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_1^n |y_i|,$$

где y_i – расстояние расчетных точек от средней линии; n – число точек профиля.

Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z (0,025–1600 мкм) – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов y_{imax} и глубин пяти наибольших впадин y_{imin} профиля в пределах базовой длины.

$$R_z = \frac{1}{10} \cdot \left(\sum_1^5 |y_{imax}| + \sum_1^5 |y_{imin}| \right).$$

Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} – это расстояние между линией выступов и линией впадин профиля. Расстояние между линиями выступов и впадин (R_{max}) равно толщине шероховатого слоя.

Опорная длина профиля – сумма длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии.

Эквидистантный – расположенный на одинаковом расстоянии от чего-либо.

Относительная опорная длина профиля – отношение опорной длины профиля к базовой длине.

Относительная опорная длина профиля в некотором приближении соответствует фактической площади контакта, которая равна сумме площадей вершин микронеровностей, попавших в сечение профиля.

Кроме перечисленных характеристик используются также средний шаг микронеровностей, средний угол наклона профиля, средний радиус закругления выступа и др.

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

Радиус кривизны микронеровности (рис. 10) определяется по выражению

$$r = \frac{d^2}{8 \cdot h},$$

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

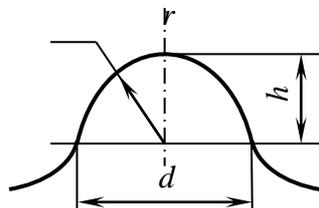


Рис. 10. Радиус кривизны микронеровности

Приведенный радиус $r_{\text{прив}}$ (средний) вершин неровностей профиля определяется как среднее геометрическое радиусов двух взаимно перпендикулярных направлений – поперечного и продольного (т. к. шероховатость имеет направленный характер, отражающий траекторию движения обрабатывающего инструмента):

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

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

Изменения поверхности при трении.

Изменения, происходящие на поверхности контакта тел при трении, разбивают на три группы:

1. *Изменение геометрии контакта* происходит по мере скольжения и под сжимающей нагрузкой. Геометрические характеристики – шероховатость поверхности, радиусы закругления неровностей, высоты, волнистости – за счет наличия в контакте промежуточных частиц (абразив, частица износа) изменяются. Неровности поверхности выглаживаются и стремятся к некоторому стабильному значению (шероховатая разглаживается, а гладкая становится шероховатой).

2. *Изменение структуры твердого тела:*

для кристаллических тел:

– развитие дефектов кристаллической структуры: точечных дефектов; линейных дефектов – дислокаций; поверхностных дефектов

(границ двойникования, границ зерен, изменение ориентации зерен и др.); объемных дефектов (скопление вакансий, образование полостей);

– изменение строения металлов: превращения кристаллических решеток; образование и растворение карбидов; диффузия и перераспределение молекул; фазовые превращения; рекристаллизация; потеря устойчивости кристаллической решетки;

для полимеров:

– ориентация цепей; изменение фазового состояния; деструкция; образование металлополимерных соединений; создание "материалов трения".

3. *Образование пленок на поверхностях трения:* адсорбционных из окружающей среды (газа, смазки); химических и хемосорбционных пленок (окислы, сульфиды, хлориды); пленок материала перенесенного на поверхность контртела; пленок при избирательном переносе при трении; пленок полимеров, образовавшихся при трении из смазки.

Методы оценки топографии поверхности

Методы измерения волнистости.

Методы основаны на применении механических и оптических систем измерения.

Метод красок и угольных пленок. На исследуемую поверхность наносят слой краски или угля толщиной 0,01–0,1 мкм. После приведения в контакт с эталоном покрытие разрушается в местах контакта выступов исследуемой поверхности с поверхностью эталона. Измеряя расстояние между разрушенными участками пленки на исследуемой поверхности или между пятнами краски, перенесенными на поверхность контртела, определяют шаг волны. Этот метод не позволяет определять высоту волны.

Растровый метод. Растровую решетку помещают под углом к исследуемой поверхности и направляют на нее луч света под углом. В отраженном свете будут видны теневые узоры, напоминающие картину Муара. Если поверхность плоская, то полосы будут параллельными прямыми, если цилиндрическая – в виде гипербол. Волнистость поверхности вызывает искривление этих полос. Чем больше высота волны, тем значительнее искривление полос.

Метод теневой проекции профиля. Исследуемую деталь помещают между экраном и источником светового излучения. При попадании части параллельного пучка света на деталь на экране образуется теневая проекция, которая воспроизводит форму профиля детали.

Этот профиль фотографируется и изучается с помощью микроскопа. Метод позволяет изучать также шероховатость поверхностей после грубой обработки детали (фрезерование, точение).

Волнометры и волнографы. Различают щуповые, оптические, пневматические (с записью профилограммы).

Щуповые. Измерительный прибор (индикатор часового типа) помещают на пластину, жестко закрепленную на станине. Исследуемую деталь перемещают или поворачивают. При этом щуп прибора, перемещаясь по поверхности детали, фиксирует ее отклонения от идеальной формы. Возможен вариант перемещения прибора относительно неподвижной детали. Недостаток прибора – сравнительно низкая точность измерений.

Оптические. Параллельный пучок света от источника направляется на зеркало, закрепленное на одной балке со щупом. Затем, отражаясь от зеркала и проходя через узкую щель, он попадает на фотоэлемент, связанный с усилителем и осциллографом. При перемещении щупа по волнистой поверхности зеркало перемещается вместе с ним в вертикальной плоскости. В результате на фотоэлемент попадает световой поток различной интенсивности. Изменение величины фототока по мере перемещения щупа позволяет судить о высоте и шаге волнистости исследуемой поверхности.

Методы измерения шероховатости.

Для измерения шероховатости применяется ряд методов, позволяющих получать параметры профиля, снятого в определенном направлении, либо топографическое изображение (трехмерное) поверхности в целом.

Методы качественной оценки

Метод визуального сравнения. Качественная оценка шероховатости поверхности осуществляется путем визуального сравнения деталей поверхностей исследуемого и эталонного образцов, выполненных из одинаковых материалов. Метод применим только для грубо обработанных поверхностей ($Ra > 0,63$ мкм).

Метод сравнения с применением оптической системы. Принцип действия прибора – световой пучок разделяется светочувствительным кубиком на две части. Одна из них направляется на эталонную поверхность, а вторая – на исследуемую. После отражения от этих поверхностей оба пучка попадают в объектив микроскопа. С помощью диафрагм регулируют ширину пучков таким образом, чтобы каждый из них занимал половину поля зрения микроскопа. Эталонные образцы заменяют до тех пор, пока изображение обеих поверхностей не становятся ви-

зуально неразличимыми. Зная шероховатость поверхности эталона, можно судить о шероховатости исследуемой поверхности.

Методы количественной оценки/

Метод светового сечения. На исследуемую поверхность направляют под углом 45° полосу света через узкую щель. Поскольку исследуемая поверхность имеет неровности, линия пересечения поверхности и световой полосы будет представлять собой кривую, повторяющую неровности, попадающие в световое сечение. Рассматривая световую полосу с помощью микроскопа под некоторым углом к поверхности, можно измерить ее отклонение от прямолинейности и по эти данным судить о микрогеометрии исследуемой поверхности. Этот метод применим только для оценки шероховатости грубо обработанных поверхностей.

Интерференционный метод. Применяют для изучения микрогеометрии гладких поверхностей. Пучок монохроматического света от источника попадает на делительный кубик и разделяется на два луча. Один попадает на зеркало и, отражаясь от него и зеркальной грани кубика, попадает на объектив. Вторым луч, отражаясь от исследуемой поверхности, также попадает на объектив. Обладая разностью хода, оба луча накладываются и образуют интерференционную картину. В фокальной плоскости окуляра формируется изображение исследуемой поверхности и система интерференционных полос в тех областях поверхности, в которых разность хода двух интерферирующих лучей равна целому числу длин полуволн. Наличие микронеровностей вызывает искривление интерференционных полос. Ширина полос интерференции является мерой высоты неровностей.

Щуповой метод. Основан на измерении вертикальных колебаний иглы, перемещаемой по исследуемой поверхности в выбранном направлении. Колебания иглы при этом повторяют неровности профиля поверхности. Они усиливаются оптической, электрической или магнитной системой и регистрируются в виде профилограммы или поступают в интегрирующее устройство, выдающее параметры шероховатости. Применяемые приборы – профилографы (профилометры). Алмазная игла-щуп имеет коническую форму с радиусом закругления вершины – 2-10 мкм. Недостатки – игла не проходит через вершину выступа, а перемещается по его склону. Это приводит к заниженным результатам измерения параметров шероховатости.

Метод слепков. Применяют для определения параметров шероховатости труднодоступных участков поверхности (крупные детали, отверстия и т.п.). Реализуется путем нанесения на исследуемую поверх-

ность пластической массы и ее отверждения. Поверхность образующегося при этом слепка является копией исследуемой поверхности.

Перечисленные методы имеют общие недостатки – параметры профиля, снятого в одном направлении, как правило, не совпадают с параметрами профиля поверхности, рассматриваемой как трехмерный объект, при профилометрировании нельзя получить информацию о строении отдельных элементов поверхности и их взаимном расположении.

Методы регистрации топографического изображения поверхности (трехмерное).

Цифровой оптический метод. Объемное изображение поверхности получают с использованием интерферометра Миро и двухмерной матрицы фотоприемников.

Монохроматическое излучение от источника попадает на полупрозрачную пластинку. Отраженный от нее луч переходит на исследуемую поверхность, проходя через интерферометр Миро, который перемещается пьезоэлектрическим элементом, управляемым микропроцессором.

Интерференционные полосы освещают формирователь изображения, состоящий из 384×240 фотоприемников. Последовательно получаемые при сканировании исследуемой поверхности световым пучком электрические сигналы обрабатываются микропроцессором, который строит трехмерное изображение исследуемой поверхности в виде набора профилограмм.

Бесконтактный метод. Основан бесконтактный метод на существовании взаимнооднозначного соответствия между ординатами профиля и величиной низкоэнергетической компоненты излучения вторичных электронов.

Метод реализуется в растровом электронном микроскопе и заключается в следующем. Электронный пучок, выходящий из катода, проходит через анод, фокусируется с помощью системы электромагнитных линз и разворачивается в растр по поверхности исследуемого образца. Вторичные электроны, излучаемые поверхностью исследуемого образца, собираются на детекторе. Полученный видеосигнал через интерфейс вывода изображения поступает на вход компьютера, где по специально разработанной программе обрабатывается. Результат обработки в табличной и графической форме выводится на принтер.

Сканирующая зондовая микроскопия. Объединяет группу методов, основанных на принципе сканирования исследуемой поверхности зондом и регистрации его перемещений в плоскости исследуемой по-

верхности и перпендикулярном к ней направлении. Метод обеспечивает получение трехмерного изображения поверхности с атомным разрешением. Были разработаны сканирующий туннельный микроскоп (Цюрих), атомно-силовой и световой сканирующий микроскопы.

Сканирующая зондовая микроскопия – самый современный метод изучения субмикрорельефа поверхности твердых тел, обладающих атомарным разрешением.

В табл. 1 представлен сравнительный анализ применяемых методов исследования топографии поверхности.

Табл. 1. Сравнение методов исследования топографии поверхности

Методы исследования	Недостатки метода
Визуальный способ	Точность оценки качества поверхности зависит от квалификации оператора и от характеристик набора образцов шероховатости
Бесконтактный способ (фокусные устройства)	Большое влияние на результат измерения оказывают: наклон поверхности, отражающая способность образца, степень его загрязненности и структура микрогеометрии. Высокая погрешность (приборы позволяют измерить неровности поверхности высотой от 0,8 до 63 мкм при погрешности показаний от 2,4 до 7,5%)
Бесконтактный способ (интерферометры)	Полученные результаты трудны в восприятии и требуют математической обработки. Вертикальный диапазон измерений очень низкий и ограничен длиной волны испускаемого света. Необходимо учитывать коэффициент отражения поверхности. Оптическая постоянная должна быть неизменной на всем протяжении исследуемого участка поверхности
Контактный способ	Влияние на измерение особенностей щупа, связанных с его размером, формой, проскальзыванием, нагрузкой на поверхность, износом. Низкая скорость измерения
Способ, основанный на применении электронных микроскопов	Образец нуждается в специальной подготовке. Трудно измерить гладкие поверхности. Низкая скорость измерения методом стереопары. Классический электронный микроскоп не позволяет проводить трехмерные измерения

ПЛОЩАДИ КОНТАКТА И ПЯТНА КОНТАКТА

Площади контакта и давления на контакте

Взаимный контакт деталей происходит по вершинам и выступам шероховатости, которая деформируется под действием внешней нагрузки.

Контактирование *реальных тел* будет осуществляться в отдельных зонах, т.е. контакт будет *дискретным* (рис. 11). Для характеристики процесса контактирования твердых тел вводят понятия площадей поверхности контакта.

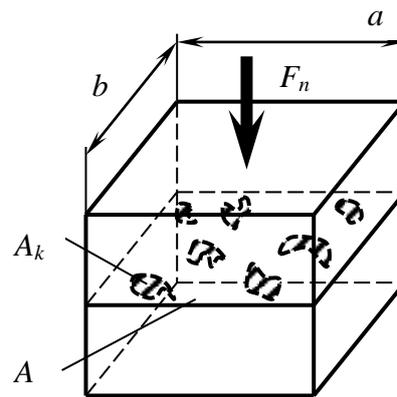


Рис. 11. Схема контакта поверхностей тел.

F_n – внешняя нагрузка, A – общая площадь поверхности, A_k – площадь поверхности контакта.

При этом различают: номинальную площадь контакта A_a ; контурную площадь контакта A_k ; фактическую площадь контакта A_r (рис. 12).

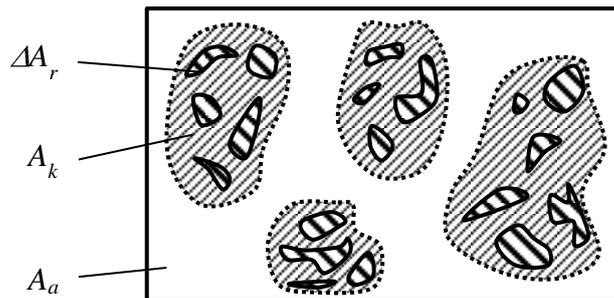


Рис. 12. Структурные компоненты реального контакта шероховатых поверхностей:

A_a – номинальная площадь контакта; A_k – контурная площадь; ΔA_r – фактическая площадь единичного пятна контакта.

Под *номинальной площадью контакта* A_a (НПК) понимают такую площадь, по которой *соприкасались бы* тела, если бы их поверхности имели идеально гладкую геометрическую форму.

Номинальная площадь контакта совпадает со всей площадью контактирующей поверхности детали. Например, если контактируют два тела с различными типами поверхностей: волнистой и абсолютно плоской, то для первого тела номинальная площадь касания равна площади волнистой поверхности, для второго – площади прямоугольника.

При контакте плоских тел НПК определяется их геометрическими размерами. При контакте тел с криволинейными поверхностями НПК зависит не только от размеров, но и от приложенной нагрузки и механических свойств этих тел, т.е. от факторов, определяющих их деформацию.

Номинальная площадь контакта определяется выражением

$$A_a = a \cdot v,$$

а номинальное давление

$$p_a = \frac{F_n}{A_a}.$$

При наличии волнистости, контактирование тел осуществляется по самым высоким неровностям (вершинам волн, пикам шероховатости). Под воздействием силовых факторов (нагрузка, вес) происходит деформирование элементов волнистости. Деформация элементов волнистости будет определять размеры площадок контакта.

Контурная площадь контакта A_k (КПК) – суммарная площадь пятен касания, обусловленная деформацией вершин волн. Контурные площадки удалены друг от друга на расстояние шага волны.

Контурная площадь контакта составляет 5–15 % от A_a , а контурное давление

$$p_k = \frac{F_n}{A_k}$$

Контурная площадь контакта определяется волнистостью поверхностей, нагрузкой и механическими свойствами контактирующих тел.

С увеличением нагрузки поверхности тел сближаются, происходит внедрение выступов более твердого тела в материал более мягкого. При этом наблюдается как упругая, так и пластическая деформация контактирующих выступов, в контакт вступают новые микронеровности. Образуется множество расположенных на различных уров-

нях площадок контакта с размером 3–50 мкм. Именно на этих площадках осуществляется *реальный (фактический) контакт*.

Фактическая площадь контакта A_r (ФПК) – суммарная площадь, на которой происходит контакт микронеровностей, образующих шероховатость поверхностей. Фактическая площадь контакта обычно мала и составляет в ненагруженном состоянии 0,01...0,1 % от A_a , при высоких нагрузках 1–10% от A_a . После снятия нагрузки 30–70% ФПК исчезает вследствие упругого восстановления материала.

Суммарная площадь фактического контакта равна

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_{ri} ,$$

а фактическое давление

$$p_r = \frac{F_n}{A_r} .$$

Контакт может быть *ненасыщенным* – число контактирующих микронеровностей n_r меньше числа микронеровностей n_c , расположенных на контурной площадке; и *насыщенным* – $n_r = n_c$.

Фактическая площадь контакта A_r меняется после первой и последующей нагрузки:

– фактический контакт *увеличивается* при увеличении нагрузки, уменьшении шероховатости (R_a), росте радиуса закруглений выступов r и с увеличением времени действия нагрузки.

– фактический контакт *уменьшается* с увеличением предела текучести материала контактирующих тел, с увеличением упругих характеристик, увеличением высоты неровности (шероховатости).

При сопряжении тел из разнородных материалов ФПК определяется физико-механическими свойствами более мягко материала и геометрией более твердого.

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

Расчет фактической площади контакта и деформации

Выступы контактирующих поверхностей под действием нагрузки деформируются упруго и пластически. При малых нагрузках имеет место упругая деформация (после снятия нагрузки форма профиля восста-

навливается), а с ростом нагрузки развивается пластическая деформация.

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 10–20 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

$$p_r = c \cdot \sigma_T,$$

где σ_T – предел текучести материала при одноосном напряженном состоянии, c – коэффициент, учитывающий влияние формы тела (для сферы $c \approx 3$ по результатам экспериментально-теоретических исследований).

Тогда материал перейдет в пластическое состояние при

$$p_r \approx 3 \cdot \sigma_T \approx HB,$$

где HB – твердость материала по Бринеллю.

Рассчитаем упругую деформацию двух приведенных в контакт сфер радиусами R_1 и R_2 (рис. 13) применяя формулу Герца:

$$A_{ri} = 0,82 \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot F_n}{R_1 + R_2} \right)^{2/3},$$

$$a_i = 0,82 \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \right)^{1/3} \cdot F_n^{2/3},$$

где A_{ri} – площадь контакта двух сфер, E_1, E_2, μ_1, μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона тел, F_n – нормальная нагрузка, a_i – сближение тел, вызванное их деформацией.

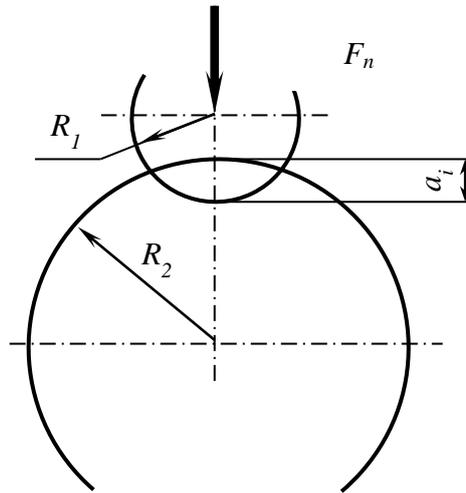


Рис. 13. Контакт двух сфер

При упругом контакте отдельной сферической неровности радиусом R с плоской поверхностью приведенные формулы преобразуются к виду

$$A_{ri} = 0,82 \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{2/3} \cdot R \cdot F_n^{2/3},$$

$$a_i = 0,82 \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{2/3} R^{-1/3} \cdot F_n^{2/3}.$$

При *пластической деформации сферы или внедрении ее в пластическое полупространство* площадь и деформацию приближенно можно оценить по выражениям, полученным в предположении, что среднее нормальное давление на контакте равно твердости более мягкого материала:

$$A_{ri} \approx \frac{F_n}{HB}, \quad a_i \approx \frac{F_n}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot HB}.$$

Если радиусы неровности поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях неодинаковы, то в расчетах можно использовать эквивалентный радиус $R = \sqrt{R_{\text{поп}} \cdot R_{\text{пр}}}$.

При контакте шероховатой поверхности 1 с гладкой плоскостью 2 (рис. 14) площадь фактического контакта равна сумме площадок контактов, образованных в результате деформирования отдельных выступов:

$$A_r = \sum_{i=1}^n \Delta A_{ri},$$

где n – число контактирующих выступов.

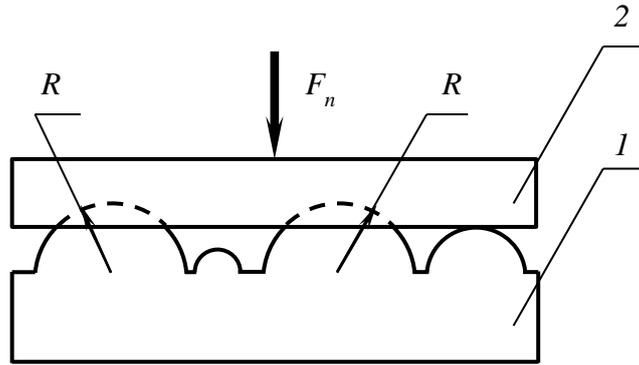


Рис. 14. Схема контакта идеально гладкой и шероховатой поверхностей

При расчетах ФПК шероховатую поверхность обычно моделируют набором сферических сегментов радиусом R , вершины которых соответствуют опорной кривой реальной поверхности (рис. 14).

Для текущего уровня p относительная опорная длина профиля

$$t_p = \frac{\eta_p}{l},$$

где η_p – длина отрезков, l – длина контактов.

Для модели будет иметь место равенство (аналогично показанной формуле)

$$t_p = \frac{A_p}{A_k},$$

где A_p – площадь сечения шероховатого слоя на уровне p , т.е. относительная опорная длина профиля принимается равной относительной площади шероховатого слоя на некотором уровне, A_k – контурная площадь контакта.

Следовательно, площадь сечения

$$A_p = t_p \cdot A_k = A_k \cdot b \cdot \left(\frac{a}{R_{\max}} \right)^v,$$

где b и v – параметры, зависящие от вида обработки поверхности ($b = 1-10$, $v = 1,6-3$); a – сближение тел, вызванное их деформацией, R_{\max} – максимальная высота неровностей.

Тогда фактическая площадь контакта

$$A_r = \alpha_y \cdot A_p = a_y \cdot A_k \cdot b \cdot \left(\frac{a}{R_{\max}} \right)^v,$$

где α_y – коэффициент, учитывающий упругую осадку выступов и их расплющивание. При упругом контакте $\alpha_y = 0,5$, а при пластическом $\alpha_y \approx 1$ (см. рис. 15).

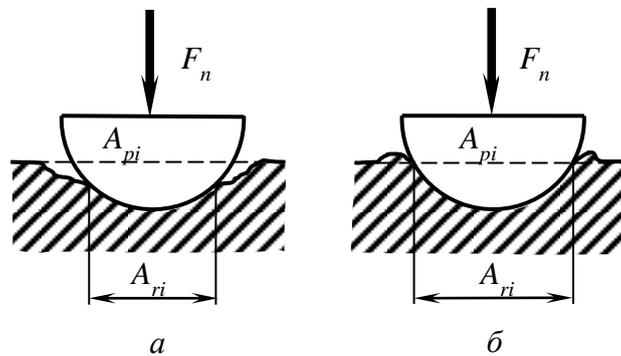


Рис. 15 Контакт сферы с упругим (а) и пластическим (б) полупространством

Исходя из приведенных формул, сближение при упругом контакте ($\alpha_y = 0,5$) определяется по выражению

$$a_{\text{уп}} = \left(\frac{2 \cdot A_r}{A_k \cdot b} \right)^{1/v} \cdot R_{\max}.$$

Если деформация выступов пластическая, то фактическая площадь равна

$$A_{ri} = \frac{F_n}{HB},$$

а сближение при пластическом контакте

$$a_{\Pi} = \left(\frac{A_r}{A_k \cdot b} \right)^{1/\nu} \cdot R_{\max} \quad \text{или} \quad a_{\Pi} = \left(\frac{F_n}{A_k \cdot b \cdot HB} \right)^{1/\nu} \cdot R_{\max}.$$

При расчете контакта двух шероховатых поверхностей вместо b , ν , R_{\max} необходимо подставить их эквивалентные значения, учитывающие свойства двух тел:

$$\nu_{\Sigma} = \nu_1 + \nu_2, \quad R_{\max \Sigma} = R_{\max 1} + R_{\max 2}, \quad b_{\Sigma} = \frac{K \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot R_{\max \Sigma}}{R_{\max 1}^{\nu_1} + R_{\max 2}^{\nu_2}},$$

где K – коэффициент, зависящий от ν_1 и ν_2 .

Методы измерения фактической площади контакта

Методы оценки ФПК делят на три группы (по классификации В.А. Белого), основанные на:

- явлению массопереноса между приведенными в контакт телами;
- передаче и переносе энергии;
- деформации неровностей и сближении контактирующих тел.

Первая группа

Метод красок – на поверхность одного из сопрягаемых тел наносят слой краски и приводят в контакт с другим телом. По размерам, форме и числу пятен после разъединения судят о ФПК. Основной недостаток – низкая точность измерения.

Метод угольных пленок – поверхность одного из сопрягаемых тел покрывают распылением в вакууме угольной пленкой ($h = 0,3$ мкм). Во время контакта пленка разрушается. Замеряют разрушенные участки. Метод дает завышенные значения.

Метод радиоактивных изотопов – слой радиоактивного вещества наносят на поверхность одного тела и приводят в контакт с другим. Радиоактивное вещество локализуется на вершинах вступающих в контакт неровностей. По интенсивности излучения и его распределению по поверхности судят о числе и размерах пятен контакта. В качестве радиоактивного вещества применяют, например, раствор хлористого цинка, содержащий изотоп Zn^{65} . Основной недостаток – трудность тарировки и зависимость результатов измерений от времени экспозиции.

Для этой группы характерна низкая точность измерения, возможность для применения только для неподвижного контакта шероховатых

тел, трудность получения тонкослойных покрытий одинаковой толщины.

Вторая группа

Метод измерения электропроводности контакта – через два приведенных в контакт тела пропускают электрический ток. По величине тока и напряжения определяют электрическое сопротивление и фактическую площадь контакта. Недостатки: низкая точность и ограниченная область применения.

Метод измерения теплопроводности контакта – роль измерителя играет разность в теплопроводности зоны контакта с материалом тел.

Акустический метод – основан на явлении распространения упругих волн (ультразвуковых), в объеме твердого тела. Мерой ФПК является коэффициент отражения волн от границы раздела сопрягаемых тел (отношение отраженной энергии к энергии падающей волны). Недостатки – воздействие ультразвуковой волны может привести к изменению структуры контактирующих тел, рассеяние ультразвуковых колебаний на неровностях поверхности, зависимость результатов измерений от фрикционного нагрева сопрягаемых тел.

Метод прозрачных моделей – два прозрачных образца приводят в контакт и пропускают пучок параллельных лучей света. Измерение ФПК основано на прохождении и рассеивании пучков в телах и воздушном зазоре между ними. Дает завышенные значения для контакта гладких поверхностей.

Метод Механ – основан на нарушении внутреннего отражения света на пятнах фактического контакта оптически прозрачного образца с непрозрачным. На участках фактического контакта свет рассеивается, что под микроскопом видно как темные пятна на зеркальном фоне. Метод обеспечивает получение надежных результатов измерения ФПК для шероховатых поверхностей, применим для статического и динамического контакта. Дает завышенные значения измерений для контакта гладких поверхностей.

Третья группа

Третья группа включает расчетно-экспериментальные методы определения ФПК, основанные на результатах измерения сближения двух контактирующих тел и исходной шероховатости поверхностей. Данная группа методов измерения наименее распространена, так как необходимо производить различные типы измерений (сближение, профили шероховатости) и применять расчеты, что приводит к снижению точности определения ФПК.

ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ТРЕНИИ.

Основные тепловые показатели и их расчет.

Энергия, необходимая для относительного перемещения трущихся тел, расходуется на разрушение адгезионных связей и деформацию материала контактирующих неровностей и прилегающих поверхностей.

Основная доля энергии ($\approx 90\%$), поглощаемая трущимися телами, трансформируется в тепловую, остальная – на искажение кристаллической решетки, звуковые эффекты, образование новых поверхностей.

Тепловыделения при трении происходят на незначительной площади, а время существования единичных пятен контакта измеряется миллисекундами.

Интенсивность тепловыделения зависит от работы трения и размеров площадки, на которой она совершается.

Работа, производимая внешней силой против сил трения, превращается в тепло и идет на нагревание трущихся тел.

Силовое взаимодействие реализуется на пятнах фактического контакта, здесь и происходит выделение тепла. Таким образом, поверхность трущегося тела покрыта тепловыми источниками (пятнами контакта), которые перемещаются по обеим поверхностям, если они шероховаты, или по гладкой поверхности, если по ней скользит шероховатое тело.

Генерируемое на пятнах контакта тепло распространяется от них вглубь обоих контактирующих тел. Количество теплоты, переносимой в единицу времени, называют *тепловым потоком*. Тепловые потоки распределяются в зависимости от теплофизических свойств контактирующих тел, их размеров и условий теплоотвода.

Совокупность точек в объеме каждого из трущихся тел, имеющих в определенный момент одинаковую температуру, называют *изотермической поверхностью*. Каждая изотермическая поверхность отделяет нагретую поверхность от менее нагретой (рис. 16 штриховые линии).

Изотермические поверхности не пересекаются. Тепловой поток вдоль такой поверхности невозможен. Передача тепла осуществляется по нормали к изотермической поверхности от более нагретых областей к менее нагретым. При удалении от источника тепла температура трущихся тел убывает.

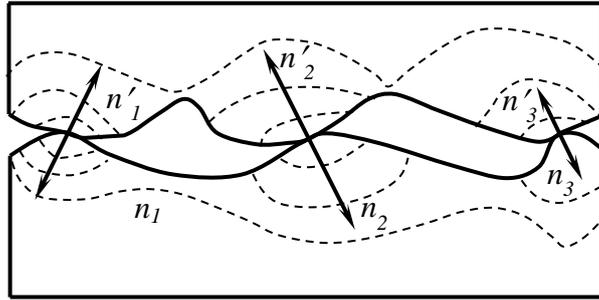


Рис. 16. Распределение тепловых потоков в трущихся телах

Совокупность мгновенных значений температуры во всех точках рассматриваемого тела называют *температурным полем*.

Если температура не является функцией времени, т.е. температура в выбранной точке не изменяется с течением времени, то такое поле называется *стационарным*. В противном случае температурное поле *нестационарное*.

Вдоль различных координат температура изменяется неодинаково. Наибольшее ее изменение наблюдается вдоль нормали к изотермическим поверхностям и характеризуется градиентом температуры

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial x}i + \frac{\partial T}{\partial y}j + \frac{\partial T}{\partial z}k.$$

Соотношение $\text{grad}T \neq 0$ является необходимым условием распространения тепла внутри тела.

Температура на поверхности контакта

При оценке тепловых процессов в зоне контакта трущихся тел следует различать: среднюю объемную температуру тел, среднюю поверхностную температуру, температуру вспышки на единичном пятне контакта и максимальную температуру на поверхности трения.

Средняя объемная температура ($T_{об}$) – это среднее значение температуры в рассматриваемом объеме одного из элементов пары трения.

Средняя поверхностная температура ($T_{п}$) – среднее значение температуры в тончайшем поверхностном слое.

Температурная вспышка ($T_{всп}$) возникает на единичных пятнах фактического контакта, может достигать температуры плавления одного из трущихся тел. Время существования вспышки составляет 10^{-3} – 10^{-8} с и определяется размерами пятен контакта и скоростью относительного перемещения трущихся тел.

Максимальная температура на поверхности трения рассматривается как сумма объемной, поверхностной температуры и температуры вспышки:

$$T_{\max} = T_{\text{об}} + T_{\text{п}} + T_{\text{всп}}.$$

Расчет температур на скользящем контакте

Аналитическое определение средней поверхностной температуры основано на применении закона Фурье. Для стационарного режима трения, при условии, что количество теплоты, поглощаемой единицей объема контактирующей поверхности равно количеству теплоты, им излучаемой, расчетная формула имеет вид

$$T_{\text{п}} = \frac{f \cdot F_n \cdot v}{A_a \cdot (\lambda_1 \cdot k_1 + \lambda_2 \cdot k_2)},$$

где $k_{1,2} = \frac{\sigma'_{1,2} \cdot u}{\lambda_{1,2} \cdot A_a}$; $\sigma'_{1,2}$ – коэффициенты теплоотдачи первого и

второго тела соответственно, u – параметр теплоотдающей поверхности, $\lambda_{1,2}$ – коэффициенты теплопроводности первого и второго тела соответственно A_a – номинальная площадь поверхности трения.

Аналитические методы расчета температуры вспышки (Х. Блок).

Фрикционный контакт представляет собой совокупность импульсно нагреваемых и охлаждаемых микроскопических пятен, перемещающихся по поверхностям трущихся тел. Координаты, размеры и время появления температурных вспышек носят случайный характер, что затрудняет их экспериментальную оценку. Поэтому для определения температуры пятен контакта используют в основном расчетные методы.

Для упрощения расчетов принимают следующие допущения:

- размеры пятна контакта малы по сравнению с размерами трущихся тел;
- теплоемкость каждого из трущихся тел неограниченно велика;
- отсутствует теплоотдача в окружающую среду;
- интенсивность тепловыделения не зависит от времени, а тепло распределяется по поверхности пятна контакта по тому же закону, что и давление;
- распределение давления на пятне и коэффициент трения известны.
- тепловой источник движется по гладкому полупространству, а для шероховатого движущегося тела он неподвижен;

– в полупространство направлен удельный тепловой поток q_2 , а в скользящий выступ шероховатого тела – q_1 .

С учетом перечисленных допущений получены формулы для расчета температуры вспышки при различных условиях контактирования.

1. Выступ, приведенный в контакт с плоской поверхностью полупространства, неподвижен относительно него. Пятно контакта имеет круглую форму с равномерным распределением q по поверхности (цилиндр по плоскости). Формула для расчета имеет вид

$$T_{\text{всп}} = \frac{q \cdot r}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (4)$$

где $q = \frac{f \cdot F_n \cdot v}{A_i}$ – удельная интенсивность тепловыделения с еди-

ничного пятна контакта, $A_i = \pi \cdot r^2$ – площадь единичного пятна контакта; r – радиус единичного пятна контакта, f – коэффициент трения, F_n – нормальная нагрузка, v – скорость скольжения.

2. Условия контактирования соответствуют первому случаю, только распределение интенсивности тепловыделения по поверхности единичного пятна принимается параболическим (трение верчения сферы по плоскости). В этом случае удельная интенсивность тепловыделения с пятна контакта определяется соотношением

$$q = q_0 \cdot \left(1 - \frac{y^2}{r^2}\right),$$

где q_0 – интенсивность тепловыделений в центре пятна, y – расстояние от центра пятна до рассматриваемой точки.

В центре пятна температура вспышки достигает наибольшего значения и определяется по формуле

$$T_{\text{всп}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{q_0 \cdot r}{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (5)$$

3. Выступ, образующий с полупространством пятно контакта круглой формы, скользит по его поверхности с малой скоростью

$$v \leq \frac{4 \cdot a}{25 \cdot r},$$

где a – коэффициент температуропроводности.

Расчет температуры вспышки можно проводить по формулам (4) и (5) как для неподвижного источника.

4. Выступ (тело 1), образующий с полупространством (тело 2) пятно контакта круглой формы, скользит по его поверхности с большой скоростью, удовлетворяющей условию

$$v > \frac{4 \cdot a_1}{r}.$$

Температура вспышки на поверхности трения выступа в центре контакта равна

$$T_{\text{всп1}} = \frac{q \cdot r \cdot \psi_1}{\sqrt{2} \cdot \lambda_1 \cdot \sqrt{\pi} + \lambda_2 \cdot \psi_1},$$

а температура вспышки на поверхности полупространства в центре контакта

$$T_{\text{всп2}} = \frac{q \cdot r \cdot \psi_1}{\lambda_1 \cdot \sqrt{\pi} + \lambda_2 \cdot \psi_1},$$

где $\psi_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot \lambda_1}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot v \cdot r}}$ – параметр, зависящий от скорости скольжения и размеров источника тепла, ρ_1 – плотность вещества тела, c_1 – теплоемкость вещества тела.

Максимальное повышение температуры в контакте определяют как среднее значение $T_{\text{всп1}}$ и $T_{\text{всп2}}$

$$T_{\text{вспср}} = \frac{q \cdot r \cdot \psi_1 \cdot (1 + \sqrt{2})}{\sqrt{2} \cdot \lambda_1 \cdot \sqrt{\pi} + \lambda_2 \cdot \psi_1}. \quad (6)$$

5. Тепловой источник круговой формы скользит по поверхности полупространства, тепло распространяется только в теле 2. Предполагается, что теплопроводность одного тела несоизмеримо мала по сравнению с другим.

При равномерном распределении удельного теплового потока q по поверхности пятна и малой скорости скольжения источника тепла температура вспышки равна

$$T_{\text{всп}} = \frac{2 \cdot q \cdot r}{\lambda_2 \cdot \sqrt{\pi}}, \quad (7)$$

а при высокой скорости скольжения максимальное значение температуры вспышки, достигаемое на границе контактной площадки равно

$$T_{\text{всп}} = \frac{q \cdot r \cdot \psi_2}{\lambda_2 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{2}. \quad (8)$$

Для движущегося по поверхности полупространства источника тепла квадратной формы с равномерно распределенной удельной интенсивностью теплового потока, температура вспышки рассчитывается по тем же формулам с заменой радиуса контакта на полуширину контактной площадки, равной половине длины стороны квадрата.

Анализируя приведенные формулы, можно сказать, что температура вспышки растет с увеличением нормальной нагрузки, коэффициента трения, скорости скольжения и уменьшением теплопроводности контактирующих тел.

Формулы Х. Блока справедливы для контакта трущихся тел, в котором пятна контакта удалены друг от друга так, что тепловое излучение одного источника не оказывает влияния на другой, т.е. тепловые источники считаются изолированными друг от друга. Для большинства реальных узлов трения это допущение справедливо, т.к. расстояние между контактирующими выступами многократно превышает размеры пятен контакта. Однако в тяжело нагруженных узлах, когда неровности поверхностей трущихся тел испытывают высокие давления и пластически деформируются, действительные значения температуры будут выше рассчитанных по приведенным формулам.

Полученные Х. Блоком решения позволяют оценивать температуру на поверхности трения. Задачу распределения температуры по глубине трущихся тел рассматривал Д. Егер. В реальных парах трения форма источников тепла в основном соответствует эллипсу, большая ось которого параллельна вектору скорости.

Д. Кюльманн-Вильсдорф получил уравнения для расчета температур вспышки на пятнах контакта эллиптической формы. Уравнения выведены на основе теории Х. Блока и Д. Егера при условии, что источники тепла расположены на границе раздела фрикционно взаимодействующих тел. Расчетные формулы усложняются и включают в себя функциональные зависимости температуры от скорости и эллиптичности пятна.

Доказано, что при малых скоростях скольжения температура вспышки достигает наибольшего значения при слабо вытянутой в направлении скольжения форме пятна. Для больших скоростей сколь-

жения – для пятен, вытянутых в направлении скольжения с коэффициентом эллиптичности в диапазоне 4–10. Максимальная температура для сильно вытянутых вдоль направления скольжения пятен (коэффициент эллиптичности >10) или вытянутых в перпендикулярном к скорости скольжения направлении, ниже, чем у пятен круговой формы.

Факторы, влияющие на температуру пятен контакта

При фиксированных значениях давления и скорости единичные пятна контакта, имеющие *большую площадь*, нагреваются до более высоких температур.

Чем *больше длина контакта* в направлении скольжения, тем выше температура вспышки, что объясняется увеличением времени нахождения материала под нагрузкой (т.е. время генерирования тепловой энергии).

Увеличение скорости скольжения сопровождается ростом максимальной температуры пятен контакта. В области малых скоростей скольжения зависимость более существенна, а по мере приближения к температуре плавления одного из элементов пары трения повышение скорости скольжения не вызывает значительного изменения температуры пятен контакта (из-за роста рассеяния тепла в окружающую среду и снижения сопротивления материала нагретых неровностей сдвигу).

Увеличение нормальной нагрузки приводит к росту температуры, причем в области малых нагрузок зависимость более существенна. По мере приближения температуры к температуре плавления одного из тел, зависимость ослабевает. Рост температуры при повышении нагрузки обусловлен повышением доли пластической деформации контактирующих тел.

Уровень температуры пятен контакта *зависит от теплофизических и механических характеристик* трущихся тел. При увеличении коэффициента теплопроводности и твердости сопрягаемых тел температура пятен контакта уменьшается.

Сварка металлов трением

Явление возникновения высоких температур в зоне трения при тяжелых режимах нагружения является причиной сварки трущихся металлов.

Чаще всего сварка имеет место в тормозах, муфтах сцепления, зубчатых передачах, системе резец – стружка обрабатываемой детали.

Выделяемое при трении тепло и пластическая деформация поверхностных слоев сопригаемых тел приводят к разрушению и удалению пленок и загрязнений из зоны контакта. Обнаженные участки поверхности трения образуют мостики сварки, не имеющие пор, раковин, включений, пленок оксидов и других дефектов.

Благодаря этому металл мостиков сварки отличается высокой прочностью и пластичностью. Прочность образующихся соединений определяется не только свойствами металлов трущихся тел и состоянием их поверхностей, но и режимами нагружения (скорость, давление, площадь контакта) и условиями теплоотвода. Это явление может быть использовано для сварки металлов трением.

Методы измерения температуры в зоне контакта.

Экспериментальные исследования тепловых процессов в зоне фрикционного контакта сопряжены с рядом трудностей, которые не позволяют разработать универсальный метод, обеспечивающий высокую точность измерения температуры.

Все существующие методы измерения температуры в зоне контакта можно разделить на две группы: *косвенные и прямые*.

Косвенные методы позволяют получить приближенные данные о температуре в зоне трения. Данная группа методов имеет ряд недостатков: низкая точность измерения; некоторые методы требуют введения в зону трения веществ, которые оказывают влияние на сам процесс трения; ограничение по диапазону температур.

– *метод цветных термоиндикаторов*: наносят вещество чувствительное к изменению температуры и по цвету судят о ее величине;

– *метод цвета побежалости*: по цвету излучающей тепло поверхности судят о ее температуре (среднее значение);

– *метод легкоплавких вставок*: температуру определяют по температуре плавления вставки;

– *метод структурных изменений*: зная температуру превращений материалов (фазового состояния) фиксируют структуру поверхности (только для температур, выше температур фазовых переходов);

– *термоэмиссионный метод*: с увеличением температуры увеличивается эмиссия электронов, по плотности потока судят о величине температуры.

В большинстве случаев *применение прямых методов* сопряжено с необходимостью вводить в объем одного из трущихся тел преобразо-

вателей тепловой энергии в электрический сигнал, либо использовать в качестве таких преобразователей элементы пары трения.

– *метод естественной термопары*: в качестве термоэлектродов служат тела трения, создающие термо-ЭДС при нагреве. Недостаток: используется только для металлов и сплавов, низкая точность измерений.

– *метод искусственной термопары*: очень мелкие термопары устанавливаются в объеме трущихся тел в предповерхностных слоях. Недостатки: измерение температуры на удалении от поверхности, оказывают влияние токи наводки и индукции.

– *метод скользящей термопары*: один электрод вводится в материал одного тела, роль другого электрода выполняет второе тело, при скольжении возникает разность потенциалов, увеличивающаяся со скоростью. Недостатки: трудность градуировки.

– *метод термосопротивления*: измеряется электрическое сопротивление выбранного участка.

– *пирометрический метод*: основаны на измерении спектра излучения нагретых тел.

– *приемники инфракрасного излучения*.

– *термографические методы* (метод фото- и киносъемки, оптико-электронные преобразователи сканирующего типа).

ПРИРОДА И ВИДЫ ТРЕНИЯ.

Классификация видов трения.

Под *трением* понимают сопротивление, возникающее при перемещении одного тела относительно другого, прижатого к первому.

По отношению к телам различают:

– *внутреннее трение* – характеризует взаимодействие, происходящее в объеме одного объекта (твердого тела, жидкости, газа, сыпучего тела). Взаимодействие осуществляется по всей геометрической поверхности выделенных слоев, движущихся между собой со скоростью, изменяющейся плавно и непрерывно.

– *внешнее трение* – взаимодействие осуществляется в общем случае между различными по строению твердыми телами и имеет двойственную атомно-молекулярную и механическую природу.

Двойственность природы внешнего трения обусловлена рассеиванием энергии при преодолении сил молекулярного взаимодействия в зонах фактического контакта и затратами энергии на преодоление механического сопротивления, связанного с формоизменением трущихся поверхностей. Реализуется в отдельных изолированных друг от друга зонах фактического контакта, скорость скольжения в которых изменяется скачком.

По кинематическому признаку различают:

– *трение покоя* – это сопротивление контактирующих тел их относительному перемещению. Приложенные нормальные и касательные нагрузки не вызывают взаимного перемещения и разрушения пятен фактического контакта, т.е. вершины контактирующих выступов не смещаются. (рис. 17, а). Трение покоя реализуется в муфтах сцепления, ременных передачах, фрикционных устройствах и т.п.

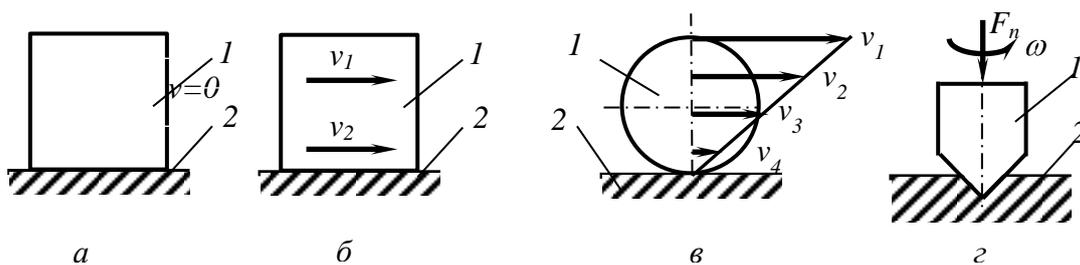


Рис. 17. Виды внешнего трения: 1 – перемещающееся тело, 2 – неподвижное тело
а – покоя; б – скольжения; в – качения; г – верчения

– *трение скольжения* наблюдается при относительном перемещении контактирующих тел и сопровождается постоянной сменой вы-

ступов поверхностей трения, вступающих в контакт. При трении скольжения сопряженные тела перемещаются поступательно и относительные скорости различных точек перемещающегося тела одинаковы (рис. 17, б). Реализуется в парах вал – вкладыш, поршень – втулка и т.д.

– *трение качения* наблюдается, когда одно тело перекачивается по другому и при повороте одного из которых относительно мгновенного или постоянного центра в контакт вступают новые участки поверхностей трения. Относительные скорости разных точек катящегося тела различны и определяются их удалением от контактной площадки (рис. 17, в). Реальные тела, обладающие упругостью, контактируют не в точке, а на некоторой площадке, поэтому иногда оба вида трения (качение и скольжение) проявляются совместно (возможно проскальзывание); Встречается в подшипниках качения, парах колесо – рельс, ролик – транспортирующая лента конвейерных систем и др.

– *трение верчения* наблюдается, когда площадь обеих поверхностей трения одинаковы, а скорости относительного перемещения зависят от удаления от центра контактной площадки и находятся в интервале от 0 до v_{\max} (рис. 17, г). Трение верчения присутствует в пятах вертикальных валов, гироскопах и т.д.

В зависимости от наличия смазки и характера ее поведения в трибосопряжении различают:

– *трение без смазочного материала (сухое трение)* – непосредственный контакт взаимодействующих поверхностей.

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.

– *граничное трение* – поверхности трущихся тел разделены граничным слоем толщиной 0,01 – 0,1 мкм, состоящим из оксидов воды, адсорбированных газов, загрязнений и смазочных веществ. Граничный слой на поверхности трения выдерживает без разрушения высокие давления и может привести к снижению трения на порядок. Граничное трение присутствует в низкоскоростных узлах трения; узлах с разовой или обедненной подачей смазочного материала в зону трения, при пусках и остановках машин.

Сухое и граничное трения сходны по своей природе и имеют общие закономерности. Причиной служит то обстоятельство, что при граничном трении мономолекулярные слои смазки прочно связаны с твердой поверхностью, обладают твердообразными свойствами и как бы служат продолжением твердой фазы. Поэтому, как и при сухом трении, фактически имеет место контакт двух твердых поверхностей.

Отличие проявляется в разных значениях коэффициента трения. Если при сухом трении он обычно больше 0,2, то при граничном его величина заключена в интервале 0,05–0,2.

– *жидкостное трение* – трущиеся поверхности разделены слоем смазочной жидкости, находящейся под давлением, которое уравнивает внешнюю нагрузку. Сопротивление перемещению трущихся тел определяется внутренним трением (вязкостью) жидкости. Сила трения не зависит от природы сопрягаемых тел. Слой жидкой смазки полностью разделяет сопряженные поверхности

Виды жидкостного трения: *гидростатическое* – давление в смазочном слое создается извне; *гидродинамическое* – смазывающая жидкость вовлекается в зазор между трущимися поверхностями и создает подъемную силу (при высоких скоростях скольжения).

Жидкостное трение реализуется в парах трения: вал – подшипник скольжения, плунжер – втулка, цилиндр – поршень гидравлических устройств.

– *газодинамическое трение* – поверхности трения разделены слоем газа. Реализуется в высокоскоростных узлах с высокой точностью перемещения элементов пар трения, применяемых в ультрацентрифугах, турбокомпрессорах, точных приборах;

– *смешанное трение*, когда одновременно имеются элементы сухого, граничного и гидродинамического трения.

ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ СМАЗКИ.

Основные понятия

Сила трения ($F_{тр}$) – усилие необходимое для преодоления сопротивления трения. Является равнодействующей элементарных сил трения на пятнах контакта.

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

$$F_{тр} = \tau \cdot A_r .$$

Удельная сила трения (τ) – сила трения, распределенная по номинальной площади касания A_a контактирующих поверхностей.

Поверхность трения – номинальная поверхность трения, на которой осуществляется взаимодействие твердых тел при внешнем трении.

Сила трения не является величиной постоянной (см. рис. 18). *Силой трения покоя* (F_n) называют сдвиговое усилие, прикладываемое к контактирующим телам, и не вызывающее их взаимного скольжения (см. рис. 18,а).

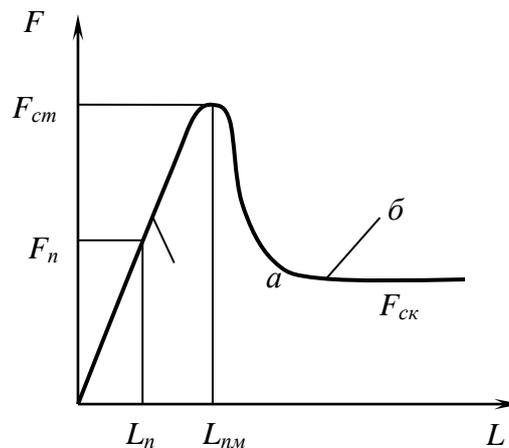


Рис. 18. Характерные случаи формирования сил трения:
а - сила трения покоя; б - сила трения скольжения

При этом взаимное перемещение (L_n) достигается за счет деформации материала выступов шероховатости в зоне контакта и называется *предварительным смещением*.

Предварительное смещение – перемещение между твердыми телами, при котором происходит изменение силы трения. Оно носит в ос-

новном упругий характер и исчезает при снятии сдвигающего усилия. Однако по мере роста сдвигающего усилия предварительное смещение приобретает пластический характер и становится частично необратимым.

На рисунке показана предельная величина предварительного смещения ($L_{\text{пм}}$) и соответственно предельное значение силы трения покоя, которое называют *статической силой трения* ($F_{\text{ст}}$).

При дальнейшем увеличении перемещения начинается скольжение ($F_{\text{ск}}$).

Коэффициент трения

Мерой оценки трения служит коэффициент трения f , который определяется как отношение силы сопротивления относительно перемещению двух тел при трении $F_{\text{тр}}$, к нормальной составляющей реакции внешних сил F_n , действующих на поверхность тела:

$$f = \frac{F_{\text{тр}}}{F_n}.$$

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 (табл. 2).

Табл. 2. Значения коэффициентов трения для различных видов трения

Вид трения	Коэффициент трения
Скольжения	
без смазочного материала	0,1-1,0
граничное	0,05-0,2
Жидкостное	0,002-0,01
Газодинамическое	0,0005-0,001
Качения	
без смазочного материала	0,005-0,01
со смазочным материалом	0,0005-0,005

В настоящее время одной из наиболее развитых теорий трения является молекулярно-механическая теория трения. Ее основы были

созданы в XX веке трудами ученых: Б.В. Дерягина, И.В. Крагельского, Ф. Бодена, Д. Тейбора и др.

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. 19).

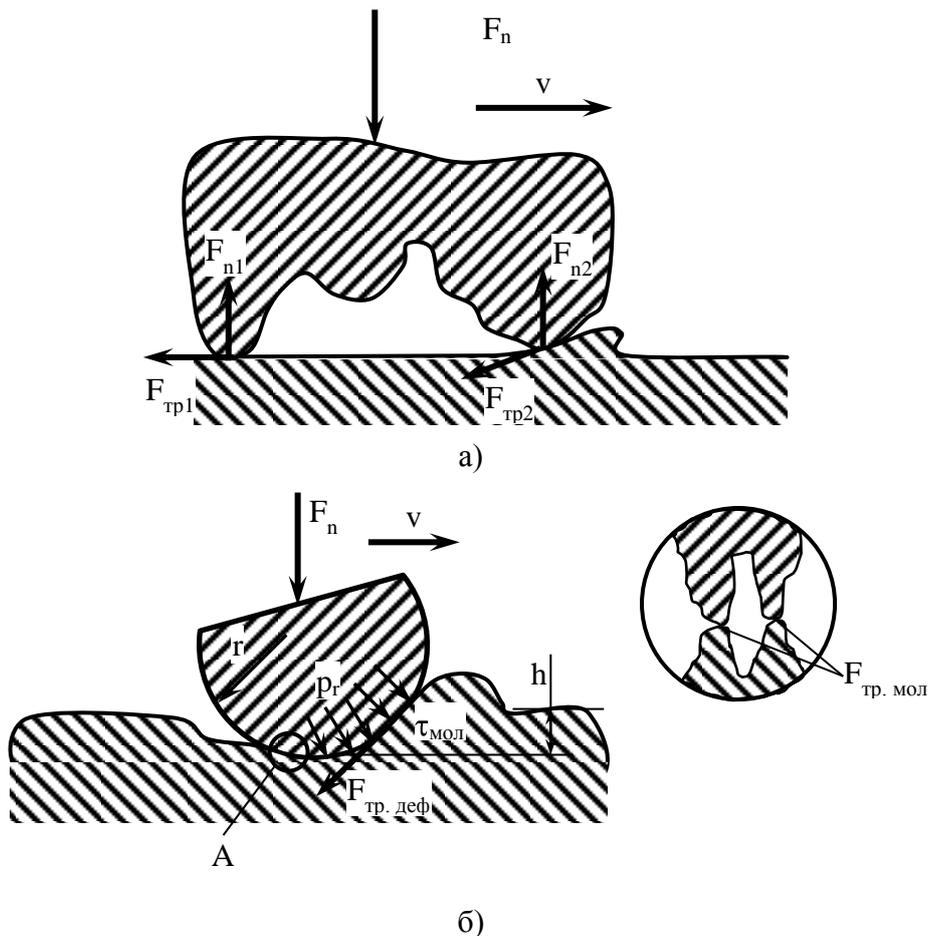


Рис. 19. Контакт двух шероховатых тел:

а – сила трения, возникающая при контактном взаимодействии двух неровностей;
 б – 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; $F_{тр. мол}$ и $F_{тр. деф}$ – молекулярная и деформационная со-
 ставляющие силы трения, действующие на отдельную неровность

Молекулярное взаимодействие обусловлено взаимным притяжением поверхностей двух тел. 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:

$$F_{тр} = F_{тр.мол} + F_{тр.деф} = \sum_1^{n_i} \Delta F_{тр.мол} + \sum_1^{n_i} \Delta F_{тр.деф}$$

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

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

$$f_{тр} = \frac{F_{тр.мол}}{F_n} + \frac{F_{тр.деф}}{F_n} = \frac{\sum_1^{n_i} \Delta F_{тр.мол}}{F_n} + \frac{\sum_1^{n_i} \Delta F_{тр.деф}}{F_n} = f_{мол} + f_{деф}.$$

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

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

$$\tau = a \cdot t, \tag{1}$$

где a – коэффициент пропорциональности.

Уравнение Френкеля для времени оседлой жизни частицы:

$$t = t_0 \cdot \exp\left(\frac{u'}{k \cdot T}\right), \tag{2}$$

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:

$$u' = u + \gamma \cdot p_r, \tag{3}$$

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

Тогда уравнение (1) с учетом (2) и (3) будет иметь вид:

$$\tau = a \cdot t_0 \cdot \exp\left(\frac{u + \gamma \cdot p_r}{k \cdot T}\right). \quad 4$$

После разложения уравнения (4) в ряд будем иметь

$$\tau = a \cdot t_0 \cdot \left(1 + \frac{u}{k \cdot T} + \frac{\gamma \cdot p_r}{k \cdot T}\right).$$

Введем обозначения

$$a \cdot t_0 + a \cdot t_0 \cdot \frac{u}{k \cdot T} = \tau_0, \quad \frac{a \cdot t_0 \cdot \gamma}{k \cdot T} = \beta.$$

Тогда получим

$$\tau = \tau_0 + \beta \cdot p_r.$$

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

$$f_{\text{мол}} = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta$$

где τ_0 – напряжение среза молекулярной связи; β – коэффициент упрочнения молекулярных связей под воздействием нормальных сжимающих напряжений (пьезокоэффициент).

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

Деформационная составляющая. Принимаем, что площадь сечения, перпендикулярная к направлению движения неровности, будет в первом приближении равна площади вписанного треугольника $A = h \cdot a_k$ (рис. 20).

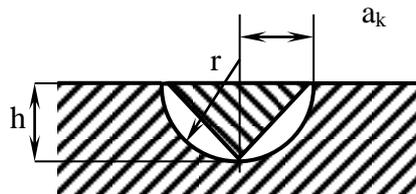


Рис. 20. Схема контакта:

a_k – радиус пятна контакта; h – глубина внедрения; r – радиус неровности в виде сферического сегмента

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

$$F_{тр.деф} = h \cdot a_k \cdot \sigma_T.$$

Нормальная нагрузка на такую неровность

$$F_n = \frac{\pi \cdot a_k^2 \cdot \sigma_n}{2},$$

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

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

$$f_{деф} = \frac{F_{тр.деф}}{F_n} = \frac{2 \cdot h}{\pi \cdot a_k}$$

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

$$f_{деф} = k \cdot \sqrt{\frac{h}{r}},$$

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

Общий коэффициент трения для единичной неровности будет иметь вид

$$f = f_{мол} + f_{деф} = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + k \cdot \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad 7$$

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 (пьекоэффициент); h – глубина внедрения неровности; r – радиус неровности.

Таким образом, коэффициент трения представляет собой сумму молекулярной и механической составляющих. Если материал на пятнах контакта деформируется в основном упруго, значение f зависит от молекулярного взаимодействия. При пластическом контакте существенную роль оказывает деформационная составляющая.

Виды контакта 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 $p_r \approx HB$:

$$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,5 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{h}{r}}.$$

Определить точно коэффициент трения, используя данное выражение, 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:

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

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

$$\Delta = \frac{R}{r \cdot b^{1/\gamma}}.$$

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

Коэффициент трения деталей, работающих в условиях *насыщенного пластического контакта*:

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

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

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

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.

Факторы, влияющие на коэффициент трения.

Нормальная нагрузка. В области малых нагрузок (левая часть зависимости на рис.) происходит в основном упругий контакт и значение f определяется в основном молекулярной составляющей коэффициента трения.

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. 21).

Данная зависимость характерна для металлов и полимеров, однако, при чрезмерном увеличении нагрузки происходит подплавление поверхностных слоев полимера, а, следовательно, снижение сопротивления сдвигу.

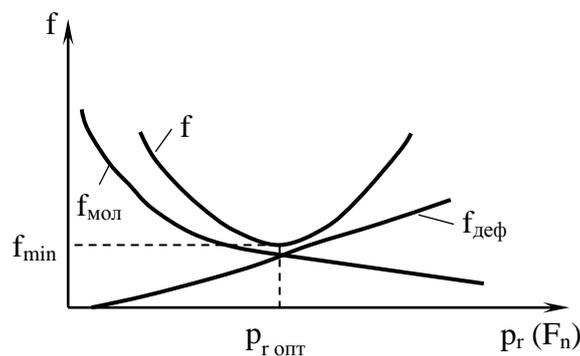


Рис. 21. Зависимость коэффициента трения от нагрузки

Микрогеометрия поверхности. Влияние микрогеометрии на коэффициент трения зависит от того, какой вид контакта (упругий или пластический) является доминирующим.

При упругом контакте (линия 1 на рис. 22) увеличение R_z приводит вначале к снижению площади фактического контакта и уменьшению молекулярной составляющей. При дальнейшем увеличении R_z радиусы закруглений вершин неровностей уменьшаются. Это способствует более глубокому внедрению их в объем деформируемого материала и увеличению деформационной составляющей (правая ветвь кривой 1 на рис. 22).

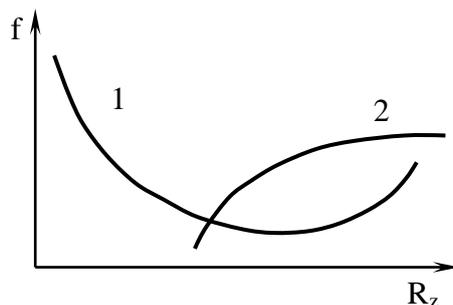


Рис. 22. Зависимость коэффициента трения от параметра шероховатости поверхности

При пластическом контакте молекулярная составляющая трения от микрогеометрии не зависит, а деформационная растет при увеличении R_z (кривая 2 на рис. 22)

Температура в зоне контакта. Для металлов с ростом температуры снижается молекулярная составляющая вследствие уменьшения твердости материала и прочности адгезионных соединений на срез. По мере приближения к T_0 падение замедляется, т.к. уменьшение твердости материала приводит к росту размеров и числа пятен фактического контакта. С дальнейшим ростом температуры увеличивается вклад механической составляющей, что способствует росту коэффициента трения в целом (рис. 23).

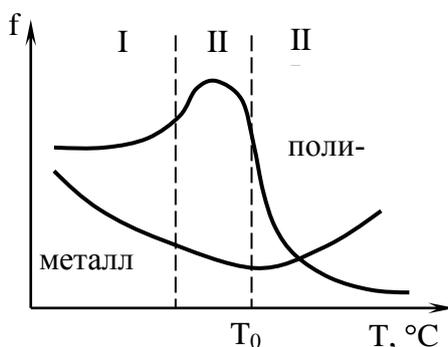


Рис. 23. Зависимость коэффициента трения от температуры

Для *полимерных* материалов зависимость удельных сил трения от температуры (участок I на рис. 23) можно представить в виде обратной пропорциональности модулю упругости. В температурном интервале зоны III (см. рис. 23) на удельные силы трения оказывают влияние вязкие свойства расплава материала, так как в зоне контакта заготовки с поверхностью инструмента происходит частичное прилипание, то происходит межслоевой сдвиг внутри образца. Переходная зона II (см. рис. 23) характеризуется незначительным изменением удельных сил трения, поэтому при расчетах принимается постоянной.

Скорость скольжения. 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 (рис. 24). Наличие максимума объясняется гистерезисными потерями, возникающими в деформируемом материале при трении.

С ростом v в области малых значений незначительно увеличивается температура на пятнах фактического контакта, что приводит к снижению твердости, а, следовательно, увеличению вязкого сопротивления деформированию.

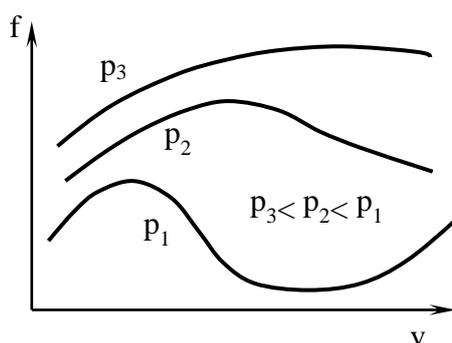


Рис. 24. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения

Падение f при дальнейшем увеличении v обусловлено как молекулярной, так и механической составляющей – деформации не успевают проникать на большую глубину, и носят упругий характер. С дальнейшим увеличением скорости происходит нагрев значительного слоя деформируемого материала в твердой фазе, что приводит к некоторому увеличению f . При интенсивном разогреве тел внешнее трение переходит к внутреннему, что приводит к росту f . Если материалы тел обладают высокими упругими свойствами, а изменение температуры не оказывает влияния на эти свойства, то коэффициент трения не зависит от скорости.

Физико-механические свойства контактирующих тел. Влияние свойств контактирующих тел на коэффициент трения связано с числом и прочностью фрикционных связей.

При увеличении твердости уменьшаются глубина относительного внедрения и число контактирующих неровностей, что приводит к уменьшению молекулярной и механической составляющих трения (кривая 1 на рис. 25).

В условиях упругого контакта f зависит от модуля упругости контактирующих тел. С увеличением модуля упругости уменьшается фактическая площадь контакта и глубина относительного внедрения неровностей, что приводит к падению коэффициента трения (кривая 2 на рис. 25).

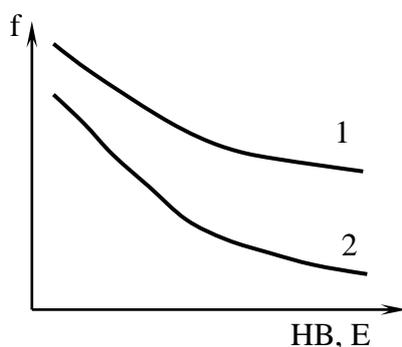


Рис. 25. Зависимость коэффициента трения от свойств материала

Существенное влияние на коэффициент трения оказывает природа контактирующих тел, определяющая энергию (тип) связей на пятнах фактического контакта, а также наличие на поверхности трения оксидных пленок и пленок адсорбированных веществ.

ТРЕНИЕ ПРИ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКЕ

Трение при граничной смазке – 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.

В режиме граничного трения *работают*:

– почти все содержащие смазочный материал тяжело нагруженные узлы трения в период их пуска или остановки (в период падения или подъема скорости скольжения). Это подшипники качения и скольжения, зубчатые передачи, пары трения: колесо – рельс, поршень – втулка, кулачок – толкатель;

– низкоскоростные узлы трения: направляющая – суппорт, винт – гайка;

– узлы с консистентным смазочным материалом, шарнирные устройства, волокна троса;

– пары инструмент – деталь при обкатке труб или тел качения, резания металлов, вытяжке проволоки.

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 малой толщины (от толщины одной молекулы до 0,1 мкм), которая соизмерима с максимальной высотой неровностей профиля. Эта пленка 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.

Формирование граничных слоев.

Граничные слои (пленки) образуются в результате *адсорбции* (осаждение на поверхности) молекул жидкой или газообразной внешней среды на поверхность твердого тела, протекающей под действием силового (электрического или магнитного) поля этого тела.

Возможна адсорбция твердых частиц (частицы графита) из коллоидной суспензии. Все масла способны адсорбироваться на металличе-

ской поверхности. Наиболее активными адсорбатами являются поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Граничные слои могут образовываться и в результате *химической реакции* смазочного материала с металлами трущихся поверхностей. Жирные кислоты, входящие в качестве присадок в масла, вступают в реакцию с металлом, образуют мыла, способные выдерживать без разрушения значительные деформации.

Благодаря подвижности граничного слоя молекул смазочного материала на поверхности трения адсорбция протекает с большой скоростью, что придает смазочной пленке свойство «самозалечиваться» в местах ее повреждения.

Молекулы смазочного материала обычно ориентируются перпендикулярно к твердой поверхности, что позволяет представить для наглядности граничную пленку в виде ворса (рис. 26).

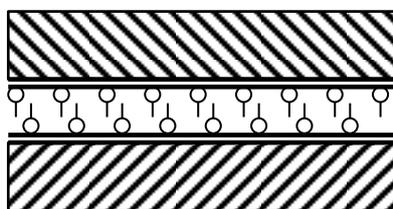


Рис. 26. Схема идеального граничного слоя

Формирование граничных слоев смазки происходит в следующей последовательности. Вначале на активных центрах твердой поверхности, имеющих заряды разных знаков, закрепляются *одиночные* молекулы ПАВ. Постепенно число таких молекул увеличивается, и они образуют сплошной молекулярный ворс *первичного монослоя*.

Вслед за первым монослоем формируется второй, третий и т.д., до 20–50 слоев, пока не достигается *насыщение граничного слоя* молекулами адсорбата. В дальнейшем наступает *динамическое равновесие*: скорости адсорбции и десорбции уравниваются, и толщина граничного слоя не изменяется.

Свойства граничных слоев

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

Граничный слой обладает *анизотропией свойств*.

В *нормальном* к поверхности трения *направлении* граничный слой обладает высоким сопротивлением сжатию: $10^2 - 10^4$ МПа. При этом наблюдаются упругие деформации.

В *тангенциальном направлении* молекулярные слои легко изгибаются и скользят относительно друг друга.

При ориентации молекул перпендикулярно к поверхности трения приложение тангенциальной силы вызывает изгиб молекул на поверхностях сопрягаемых тел в противоположные стороны. Сопротивление относительно перемещению тел незначительно.

Если молекулы смазочного материала расположены параллельно поверхности (силиконовые соединения), трение может рассматриваться как гидродинамическое в тонком слое (механизм трения подобен механизму при жидкостном трении). В этом случае наиболее важной характеристикой является вязкость масла.

Механизм трения.

Механизм трения при граничной смазке представляется в следующем виде (рис. 27). Под действием нормальной нагрузки возникают упругая и пластическая деформации на площадках контакта, на которых может реализовываться взаимное внедрение поверхностей без нарушения целостности смазочной пленки (A_2 – мономолекулярный слой).

На отдельных, наиболее нагруженных площадках, а также при их локальном нагреве возможно нарушение сплошности граничного слоя и возникновение адгезионного взаимодействия между оксидными пленками сопрягаемых металлов (A_3 – контакт оксидных пленок).

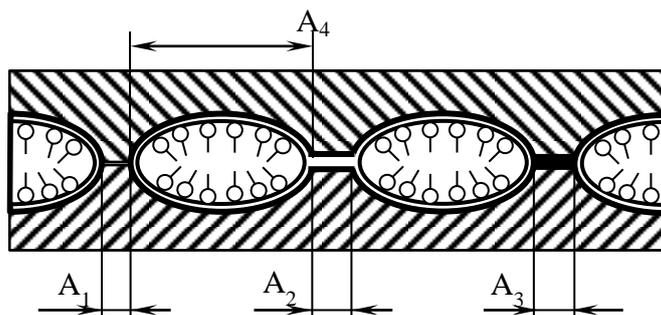


Рис. 27. Схема реального граничного слоя:

A_1 – металлический контакт; A_2 – мономолекулярный слой;
 A_3 – контакт оксидных пленок; A_4 – полимономолекулярный слой

Кроме того, на площадках контакта может произойти временное разрушение смазочной пленки (адсорбционной и оксидной) и даже

схватывание металлов на микрошероховатостях. Это будет вызывать дополнительное сопротивление движению (A_1 – металлический контакт). В дальнейшем, благодаря адсорбции, такие металлические участки снова покрываются смазочным слоем, т.е. «залечиваются», и т.д.

Слабо нагруженные неровности поверхностей трущихся тел разделены полимолекулярным граничным слоем (A_4 – полимолекулярный слой)

Влияние параметров

Сила трения и коэффициент трения при граничной смазке зависят от многих факторов.

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.

Микрогеометрия поверхности.

При увеличении *шероховатости* коэффициент трения переходит через минимум, причем, чем тоньше пленка смазки, тем влияние этого параметра выражается более отчетливо (рис. 28).

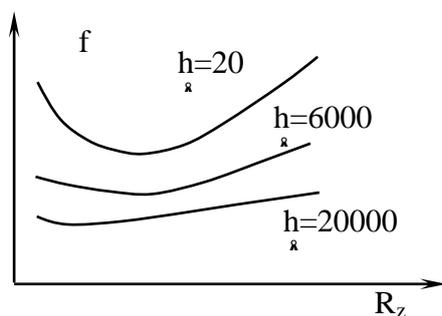


Рис. 28. Влияние R_z на величину коэффициента трения

При граничном трении скольжения минимальному трению соответствует оптимальная шероховатость порядка $R_z = 0,1$ мкм.

Скорость скольжения.

Скорость скольжения влияет на коэффициент трения неоднозначно. Коэффициент трения зависит от уровня скоростей (низкие, высокие) и от типа смазочного материала.

В области *низких скоростей* для чистых минеральных масел коэффициент трения уменьшается при увеличении скорости (кривая 1 на

рис. 29, а) и в некоторый момент стабилизируется. Это объясняется сокращением времени жизни фрикционных связей, уменьшением площади, числа и размеров пятен контакта и уменьшением вероятности разрушения граничного слоя.

При использовании в качестве смазки составов на основе *жирных кислот* коэффициент трения возрастает (кривая 2 на рис. 29, а). В этом случае играет важную роль вязкость смазки. Сопротивление граничных слоев сдвигу возрастает с увеличением скорости, их поведение становится подобным поведению твердого тела, что приводит к увеличению коэффициента трения.

При *высокоскоростном граничном трении* основную роль играет вязкость смазки. С ростом скорости скольжения увеличивается температура в зоне контакта, что приводит к разориентации, а на отдельных участках и разрушению граничных слоев. Это приводит к увеличению возможности локального схватывания трущихся тел. С уменьшением толщины граничного слоя (переход от кривой 2 к кривой 1 на рис. 29, б) зависимость более ярко выражена.

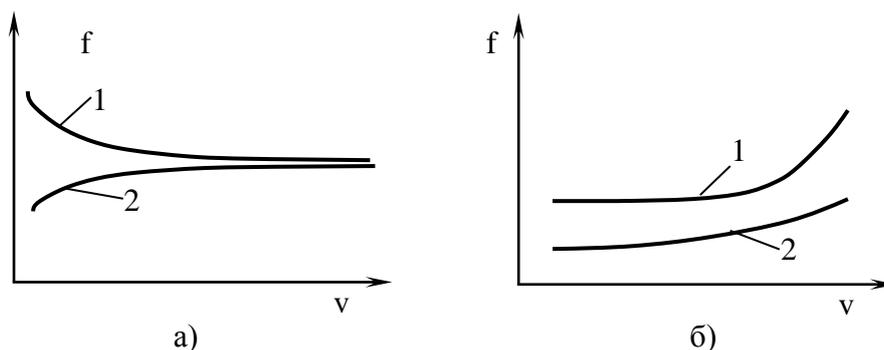


Рис. 29. Влияние скорости скольжения на коэффициент трения при граничной смазке: а – низкие значения скорости, б – высокие значения скорости

Температура.

В ряде случаев наблюдается рост коэффициента трения при увеличении температуры. Это объясняется тем, что граничное трение в отдельных точках фактического контакта переходит в сухое трение. При низких температурах, когда граничный слой находится в твердом состоянии, нагрев поверхности трения снижает сопротивление сдвигу, вплоть до перехода его в квазижидкое состояние.

Это приводит к снижению коэффициента трения. Коэффициент трения падает по мере приближения к точке плавления смазки и резко возрастает при переходе к смазке с низкой вязкостью η (рис. 30).

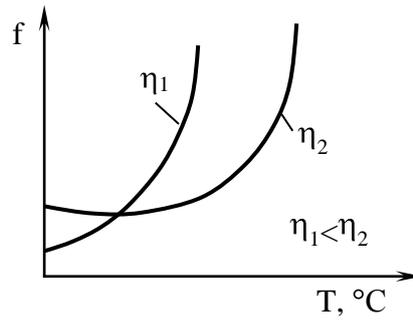


Рис. 30 Влияние температуры на коэффициент трения

Нормальная нагрузка (давление).

При увеличении *нагрузки* коэффициент трения резко уменьшается. 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. 31).

Начиная с точки *B*, утонение пленки прекращается. На участке *AB* имеется достаточно толстый слой смазки, вследствие чего в этом слое молекулы жидкости не связаны так прочно с твердым телом.

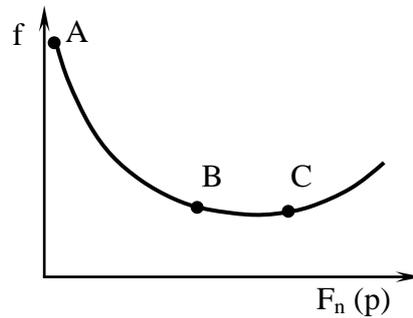


Рис. 31. Влияние нормальной нагрузки (давления) на коэффициент трения

При достижении *очень высоких* давлений увеличение сил взаимодействия по мере сближения поверхностей сопровождается разрушением граничных слоев на отдельных пятнах контакта. Соответственно, коэффициент трения увеличивается (после т. *C*).

Вязкость смазки.

Вязкость масла при граничной смазке не оказывает значительного влияния на процесс трения. Для снижения коэффициента трения применяют такой смазочный материал, молекулы которого обладают сла-

бым взаимодействием между собой (оказывают слабое сопротивление сдвигу) и сильным взаимодействием с поверхностями твердых тел. Это свойство масел называют *маслянистостью*. Ее оценивают с помощью профилографа, сравнивая профилограммы смазанной и несмазанной поверхностей $\Delta = R_{a\text{ несмаз}} - R_{a\text{ смаз}}$. Чем больше по абсолютной величине Δ , тем выше маслянистость и меньше вероятность разрыва граничной пленки и образования мостиков сварки.

С увеличением *толщины* слоя смазки коэффициент трения падает до тех пор, пока не начинают проявляться объемные свойства смазочного материала.

ЖИДКОСТНОЕ ТРЕНИЕ

Жидкостное трение представляет собой такой вид контактного взаимодействия твердых тел, при котором их поверхности трения полностью разделены жидким или пластичным смазочным материалом. При этом непосредственный контакт сопрягаемых тел исключен, а сопротивление относительно перемещению этих тел определяется внутренним трением смазочной среды.

Толщина смазочного слоя при жидкостном трении многократно превышает толщину граничной пленки.

При установившемся режиме нагружения жидкостное трение реализуется в опорах скольжения, зубчатых передачах, цилиндропоршневых группах, парах трения плунжер–штука гидравлических насосов и др.

Необходимым условием существования жидкостного трения является разделение трущихся поверхностей слоем смазки h_{\min} , который воспринимает приложенную нормальную нагрузку (рис. 32). В этом случае внешнее трение твердых тел заменяется внутренним трением слоев жидкости.

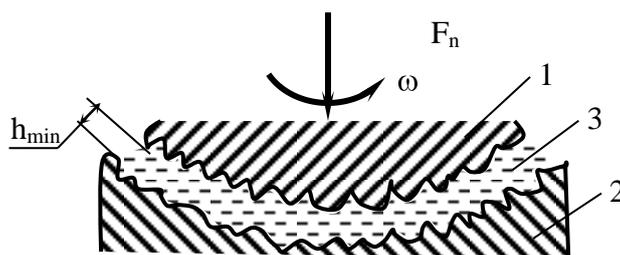


Рис. 32. Схема трибосопряжения с жидкостной смазкой:
1 – вал; 2 – подшипник; 3 – слой смазки

Для жидкостного трения толщина смазки должна превышать суммарную высоту наиболее высоких неровностей сопрягаемых поверхностей $h_{\min} > (R_{\max 1} + R_{\max 2})$ рабочий зазор должен быть

$h_{\text{раб}} = \frac{h_{\min}}{R_{a_1} + R_{a_2}}$. Практикой выработан следующий критерий для жид-

костного трения: $5 \leq h_{\text{раб}} \leq 100$.

Толщина пленки зависит от вязкости смазочного материала, величины и времени действия нагрузки, прижимающей трущиеся тела друг к другу и геометрии этих тел.

При жидком трении наблюдается перемещение смазочного материала в направлении скольжения, давление и температура распределены более равномерно, чем при других видах трения, что обеспечивает низкую интенсивность изнашивания.

В зависимости от способа создания давления в смазочном слое, уравнивающего внешнюю нагрузку, различают гидростатическую, гидродинамическую и эластогидродинамическую смазки.

Гидростатическая смазка

Гидростатическая смазка предусматривает образование между трущимися телами сплошной пленки жидкости, расход которой и падение давления компенсируются подачей жидкости в зону трения извне.

Подача смазывающей жидкости в зону трения осуществляется под давлением через смазочные каналы, связывающие насос и смазочный карман, выполненный в поверхностном слое одного из трущихся тел.

Сущность гидростатической смазки можно рассмотреть на примере гидростатического упорного подшипника (рис. 33).

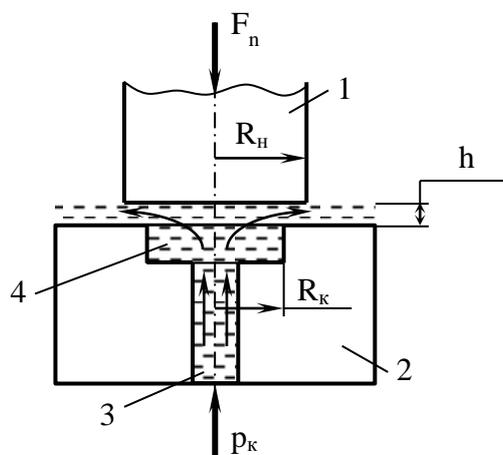


Рис. 33. Гидростатический упорный подшипник

1 – вал; 2 – неподвижный элемент; 3 – смазочный канал; 4 – карман.

R_n – радиус поверхности трения меньшего из сопрягаемых тел; R_k – радиус поверхности цилиндрического кармана.

Верхний элемент подшипника (вал 1), который может быть неподвижным или вращаться вокруг вертикальной оси, контактирует плоской поверхностью с нижним неподвижным элементом 2, содер-

жащим смазочный канал 3. Последний связывает насос с карманом 4. Создаваемое насосом постоянное давление p_k в смазочном кармане и переменное давление на остальной части поверхности контакта элементов упорного подшипника уравнивает давление от внешней нагрузки F_n . Непрерывная подача смазочной жидкости в зону трения насосом обеспечивает постоянное существование сплошного смазочного слоя, разделяющего трущиеся тела.

В качестве смазывающей среды можно использовать воздух, но в этом случае насос должен обладать значительно более высокой мощностью.

Преимущества гидростатической смазки:

- обеспечивается несущая способность и существование смазочного слоя в низкоскоростных узлах трения;
- достигаются близкие к нулю значения коэффициента трения и износа;
- на процессы трения и изнашивания элементов трибосопряжений не оказывают существенного влияния колебания нагрузки и скорости скольжения;
- менее жесткие требования предъявляются к качеству поверхностей трения и свойствам материалов трущихся тел.

Недостатки гидростатической смазки:

- сложность конструкции опор;
- наличие специальных уплотнительных устройств;
- создание специальных насосных станций;
- при высоких скоростях вращения вала – наличие специальной системы охлаждения узла трения.

Применение гидростатической смазки в низкоскоростных узлах трения:

- упорных и радиальных крупногабаритных подшипниках скольжения;
- амортизаторах;
- гидравлических подвесках;
- плоских опорах скольжения;
- для разгрузки тяжело нагруженных гидродинамических опор в период пуска и остановки.

Гидродинамическая смазка

Гидродинамическая смазка трущихся тел имеет место при обеспечении условий для образования несущего слоя жидкости, разделяющего эти тела, без создания давления извне.

Основным из таких условий является обеспечение градиента скорости перемещения частиц жидкости по толщине масляного слоя. Это возможно при относительном перемещении поверхностей сопрягаемых тел, существовании взаимодействия (прилипания) между жидкостью и поверхностями трения твердых тел, наличии трения между частицами жидкости (вязкость).

Второе условие – создание градиента давления вдоль смазочного слоя, т.е. в направлении движения потока жидкости. Это может быть реализовано при наличии клинового зазора между трущимися телами (переменная толщина смазочного слоя).

Основы гидродинамической теории смазки созданы трудами Н.П. Петрова и О. Рейнольдса.

Рассмотрим механизм возникновения гидродинамического эффекта в *опорном подшипнике скольжения* (рис. 34).

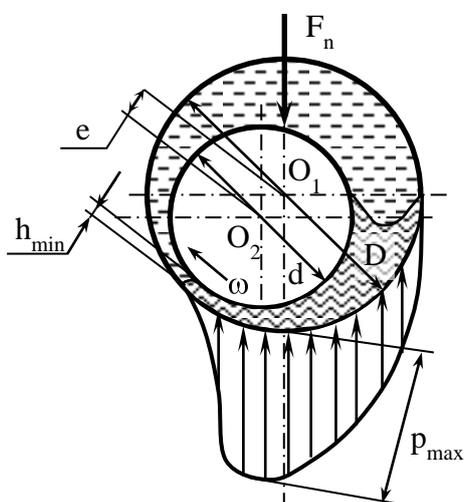


Рис. 34. Схема подшипника скольжения

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} .

При вращении вала молекулы смазывающей жидкости, адсорбированные на его поверхности, перемещаются со скоростью, близкой к скорости точек поверхности вала, и увлекают за собой взаимодействующие с ними молекулы смежного нижележащего слоя. Благодаря

наличию скольжения между слоями жидкости скорость перемещения нижележащего слоя относительно подшипника будет меньшей. Скорость перемещения жидкости по мере приближения к поверхности трения подшипника будет изменяться от максимального значения до нуля.

При вращении вала и наличии внутреннего трения в жидкости происходит ее непрерывное затягивание в сужающийся зазор, т.е. вал работает как насос, поддерживающий непрерывную циркуляцию жидкости.

Затягивание жидкости в сужающуюся часть зазора приводит к возникновению в ее объеме избыточного нормального давления на поверхность вала, которое растет по мере уменьшения зазора.

Максимальное давление p_{\max} смещено от оси O_1O_2 в сторону, противоположную вращению вала (в области минимального зазора). Эпюра распределения давления в масляном слое по дуге контакта будет несимметричной (рис. 34).

Таким образом, в смазочном слое подшипника создается давление, которое может оказаться достаточным для уравнивания внешней нагрузки и отделения вала от подшипника – вал всплывает на тонком смазочном слое.

Несущая способность смазочного слоя зависит от его толщины, скорости скольжения и динамической вязкости жидкости.

Минимальную толщину слоя, при которой сохраняются условия для гидродинамического трения, можно примерно оценить по формуле:

$$h_{\min} = 0,57 \cdot \frac{\eta \cdot v \cdot d \cdot l}{F_n}$$

где η – динамическая вязкость жидкости, $v = r \cdot \omega$ – скорость скольжения, ω – угловая скорость, d – диаметр вала, $l \gg d$ – длина подшипника, F_n – внешняя нагрузка.

Минимальный зазор должен превышать сумму высот наиболее выступающих неровностей поверхностей тел трения.

$$h_{\min} \geq K \cdot R_{z1} - R_{z2} \text{ ,}$$

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

В противном случае возможны кратковременные локальные разрывы смазочной пленки и переход отдельных областей в состояние граничной смазки.

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

$$\psi = \frac{D-d}{d} = \frac{R-r}{r} = \frac{\delta}{r}; \quad \chi = \frac{e}{\delta},$$

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

Расчет коэффициента трения при гидродинамической смазке можно осуществлять по формуле, полученной на основании основного закона вязкого течения жидкости, если учесть, что сила трения по обобщенному закону вязкого течения Ньютона равна

$$F_{mp} = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dy} = \eta \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot \frac{\omega}{\psi},$$

а нормальное усилие можно выразить через давление

$$F_n = p \cdot d \cdot l,$$

то коэффициент трения после преобразования равен

$$f = \frac{F_{mp}}{F_n} = \frac{\pi}{\psi} \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{p},$$

где η – динамическая вязкость жидкости, ω – угловая скорость, ψ – относительный зазор, p – давление на контакте.

Рассмотренные механизм и количественные характеристики гидродинамического трения представляют собой упрощенный вариант, основанный на ряде допущений. В реальных условиях этот процесс более сложный, т.к. поверхности сопрягаемых тел имеют макро- и микрогеометрические отклонения от идеальной формы, существует торцевая утечка смазочного материала, вязкость смазки не является величиной постоянной, а изменяется по длине слоя в зависимости от температуры и давления.

Эластогидродинамическая смазка.

Разновидностью гидродинамической является эластогидродинамическая смазка.

В связи с тем, что трущиеся детали не являются абсолютно жесткими, при приложении нормальной нагрузки они (или хотя бы одно из них) испытывают существенные деформации, вызывающие искривле-

ние сопрягаемых поверхностей. При этом площадь контакта, на которую распределяется внешняя нагрузка, увеличивается, а давление снижается и остается недостаточным для уменьшения толщины смазочного слоя.

Для контакта жесткого цилиндра с упругой плоскостью (рис. 35) толщину смазочного слоя h можно определить по формуле

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2 \cdot R} + h_{упр},$$

где h_0 – минимальная толщина смазочного слоя при отсутствии деформации трущихся тел, x – текущая координата, R – радиус цилиндра, $h_{упр}$ – толщина смазочного слоя, равная суммарной упругой деформации контактирующих тел (зависит от свойств материала контактирующих тел и приложенного давления).

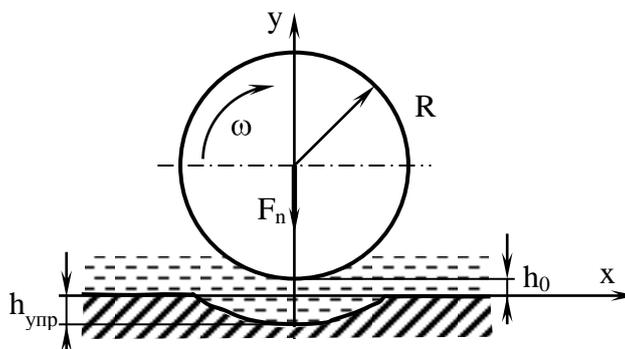


Рис. 35. Эластогидродинамическая смазка пары трения жесткий цилиндр – упругая плоскость

Толщина смазочного слоя в реальных узлах трения может значительно превышать расчетное значение, особенно при высоких давлениях, благодаря упругой деформации элементов пары трения.

Учет изменения вязкости жидкости под действием давления и температуры может внести существенную поправку в расчет толщины смазочного слоя.

Особенно сильно эластогидродинамический эффект проявляется при трении тел, материал которых имеет низкий модуль упругости. На рис. показан эластогидродинамический эффект при скольжении упругого цилиндра по жесткому основанию (рис. 36).

При скольжении упругого тела по жесткому основанию материал цилиндра испытывает упругие деформации в зоне контакта. Т.к. нормальное давление распределено по ширине контактной площадки по эллиптическому закону, поверхность цилиндра в центральной части контакта будет напоминать плоскость, расположенную почти парал-

тельно поверхности основания, а вязкость жидкости в этой части контакта будет значительно выше, чем на входе.

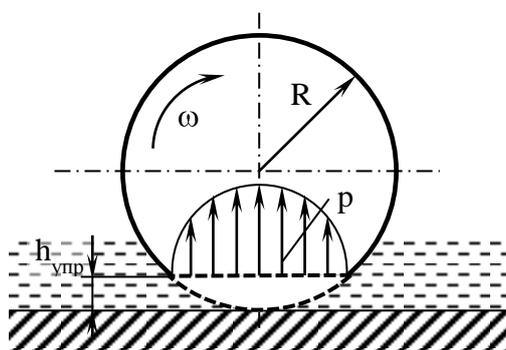


Рис. 36. Эластогидродинамический эффект пары трения упругий цилиндр – жесткая плоскость

Поэтому гидродинамическое давление на входе в контакт незначительно, а по мере перемещения с центральной оси оно возрастает и достигает максимума в окрестностях центра контактной площадки. Вблизи зоны выхода трущихся тел из контакта давление приближается к нулю и деформация цилиндра такова, что наблюдается резкое сужение толщины смазочного слоя и падение вязкости жидкости. В результате скорость течения жидкости в зоне минимального зазора резко возрастает, что ведет к интенсивному подъему гидродинамического давления.

Влияние параметров на гидродинамическое трение

Наиболее важными эксплуатационными факторами, определяющими условия формирования смазочного слоя, являются давление (внешняя нагрузка и размеры трущихся тел), вязкость смазочной жидкости и скорость относительного перемещения поверхностей трения сопрягаемых деталей.

Переход от трения без смазочного материала к граничному трению и выход на гидродинамический режим можно проследить до диаграмме Герси–Штрибека. Диаграмма показывает зависимость коэффициента трения от параметра $\frac{\eta \cdot \omega}{p}$. Кривую (рис. 37) можно разделить на три участка. Начало первого участка соответствует трению без смазки и характеризуется высокими значениями коэффициента трения. Падение коэффициента трения говорит о переходе к граничному трению. Второй

участок соответствует полужидкостному трению, а трений – жидкостному.

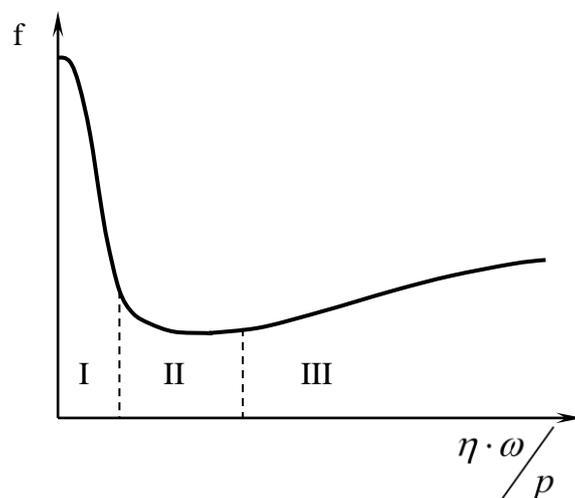


Рис. 37. Диаграмма Герси–Штрибека:

I – граничное трение, II – полужидкостное трение, III – жидкостное трение

При малых *скоростях* вращения вала вовлечение смазочной жидкости в зону контакта происходит медленнее, чем ее выдавливание внешней нагрузкой. Поэтому давление в слое жидкости остается недостаточным для всплытия вала. В итоге реализуется граничное трение. С увеличением скорости давление в слое возрастает, уменьшается число участков с граничной смазкой и постепенно создаются условия для полного разделения поверхностей трения вала и подшипника смазочным слоем. Это ведет к монотонному падению коэффициента трения, минимум соответствует началу жидкостного трения. Дальнейшее увеличение скорости вращения ведет к увеличению градиента скорости перемещения жидкости в слое по его толщине, что приводит к повышению внутреннего трения в жидкости и, соответственно, росту коэффициента трения.

При низкой *вязкости* смазывающей жидкости толщина смазочного слоя недостаточна для полного разделения трущихся поверхностей, реализуется режим граничной смазки, и коэффициент трения принимает высокие значения. С повышением вязкости жидкости в зону трения втягивается ее больший объем, толщина смазочного слоя возрастает, наблюдается переход к гидродинамическому трению и коэффициент трения падает. Для высоковязких жидкостей увеличение динамической вязкости приводит к увеличению внутреннего трения, которое при гидродинамическом трении имеет особо важную роль.

При больших давлениях условия для жидкостного трения неблагоприятны, т.к. внешняя нагрузка может оказаться выше реакции смазочного слоя. С уменьшением нагрузки происходит всплывание вала и падение коэффициента трения. При малых нагрузках толщина смазочного слоя становится выше оптимальной, дальнейшее уменьшение давления сопровождается ростом коэффициента трения.

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 наблюдается, когда одно тело перекачивается по другому и при повороте одного из которых относительно мгновенного или постоянного центра в контакт вступают новые участки поверхностей трения. Относительные скорости разных точек катящегося тела различны и определяются их удалением от контактной площадки (рис. 38).

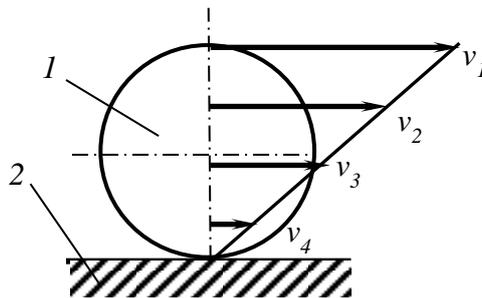


Рис. 38. Трение качения: 1 – перемещающееся тело, 2 – неподвижное тело

Трение качения встречается в подшипниках качения, парах колесо–рельс, ролик – транспортирующая лента конвейерных систем и др.

Различают *чистое качение* и *качение с проскальзыванием*.

Чистое качение – контакт тел является идеально упругим и происходит по линии (для цилиндра) или в точке (для сферы).

Качение будет чистым, если при повороте тела на малый угол φ его ось смещается на величину $R \cdot \varphi$. Точки касания тела с основанием неподвижны относительно последнего.

На практике всегда реализуется *качение с проскальзыванием*.

Качение с проскальзыванием – контакт двух тел осуществляется по некоторой поверхности вследствие упругопластических и вязкопластических деформаций (рис. 39).

Контакт реальных тел качения представляет собой площадку конечных размеров, а не точку или линию, тогда линия действия реакции F_n^* плоскости не совпадает с линией действия нормальной силы F_n . Точка ее приложения смещается от центра контактной площадки к ее передней границе.

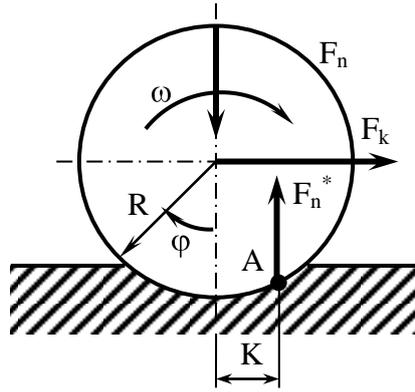


Рис. 39. Схема качения колеса по плоскости

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

Составив уравнение моментов относительно точки A , получим:

$$\sum M_A = F_k \cdot R - F_n^* \cdot K = 0,$$

$$K = \frac{F_k \cdot R}{F_n^*} = f_k.$$

Смещение K называется *коэффициентом трения качения*, имеющим *линейную размерность*.

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

$$f_c = \frac{K}{R} = \frac{f_k}{R} = \frac{F_k}{F_n^*}$$

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

Природа трения качения.

Согласно современным представлениям, 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 :

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

В реальных условиях при качении тела могут наблюдаться все три составляющие трения качения одновременно (рис. 39).

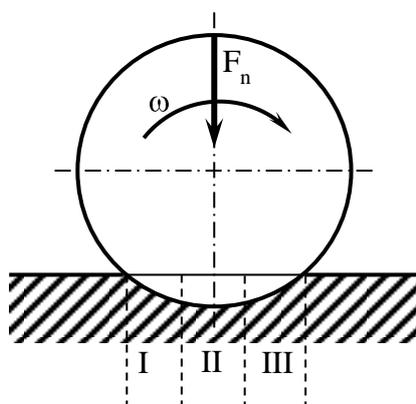


Рис. 39. Зоны локализации адгезионного взаимодействия, гистерезисных потерь и проскальзывания при качении цилиндра

На *первом участке* (рис. 39) реализуется в основном адгезионное взаимодействие. На этом участке поверхности трения тел качения будут разделяться с разрывом адгезионных связей. *Гистерезисные потери* (первый и третий участки) наблюдаются в областях максимальных деформаций сдвига и нормальных деформаций материалов контактирующих тел в направлении вектора скорости. *Проскальзывание* реализуется на всей длине контакта (все три участка).

Четвертая составляющая трения качения – механические потери в смазочном материале (качение по смазке).

Упругий гистерезис возникает вследствие несовершенства упругих свойств реальных тел, участвующих в трении качения (рис. 40).

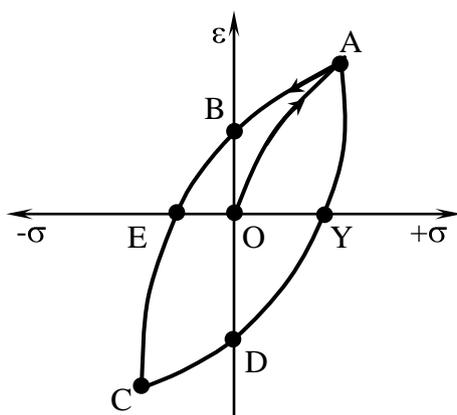


Рис. 40. Петля гистерезиса при знакопеременном нагружении материала

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. 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.

Таким образом, каждый элемент плоскости, по которой катится цилиндр, испытывает последовательно цикл «нагрузка-разгрузка», который описывается петлей гистерезиса.

Физически гистерезис обусловлен перемещением дислокаций при нагружении. Увеличение числа дислокаций увеличивает гистерезисные потери.

Сила трения качения *жесткого цилиндра по упругому полупространству* описывается формулой:

$$F_k = \frac{4 \cdot \alpha_g}{3 \cdot \pi} \cdot \frac{F_n \cdot b}{l \cdot R},$$

где b – полуширина площадки контакта, α_g – коэффициент гистерезисных потерь (зависит от нагрузки, и вида деформирования), l – длина цилиндра, R – радиус цилиндра, F_n – нормальная нагрузка.

В общем случае гистерезисные потери обусловлены внутренним трением, а также пластическим деформированием микровыступов и пластическим оттеснением граничного смазочного слоя.

Теоретическое изучение сопротивления качению при несовершенной упругости было выполнено А. Ю. Ишлинским.

При качении *цилиндра по вязкоупругому основанию* для малых скоростей $F_k = c \cdot \frac{F_n \cdot v}{R}$, для больших – $F_k = c \cdot \frac{F_n^{3/2}}{v \cdot R^{1/2}}$,

где c – константа, включающая параметры модели, v – скорость качения.

Видно, что в интервале малых скоростей качения увеличение скорости приводит к росту сопротивления качения, а при больших скоростях – к его уменьшению.

Сопротивление качению *шара по поверхности пластического основания* выражается соотношением

$$F_k = \frac{F_n^{3/2}}{\pi \cdot R \cdot \sigma_n^{1/2}},$$

где σ_n – нормальные напряжения, зависящие от давления на контактной площадке и механических свойств тел качения.

Гистерезисная теория справедлива для качения твердых тел по резине, однако распространение ее на металлы не всегда оправдано.

Основной причиной сопротивления качению считается *проскальзывание*. Проскальзывание может быть обусловлено деформацией контактирующих тел (О.Рейнольдс) или различием в скоростях различных точек катящегося тела (А.Пальмгрен и Г.Хизкоут).

Проскальзывание по Рейнольдсу наглядно наблюдается при качении жесткого цилиндра по резине. За один оборот цилиндр проходит меньшее расстояние, чем длина его окружности. Это объясняется деформацией контактирующих тел. Под действием нормальной нагрузки материал основания деформируется и контакт осуществляется не по линии, а по площадке шириной AC (рис. 41). При этом материал цилиндра в зоне контакта сжат, а материал опорной поверхности растянут. Поэтому при повороте цилиндра освобождающиеся от контакта точки его поверхности будут стремиться удалиться друг от друга, а точки поверхности – сблизиться. Это приводит к проскальзыванию микроучастков контактирующих поверхностей одного тела относительно другого.

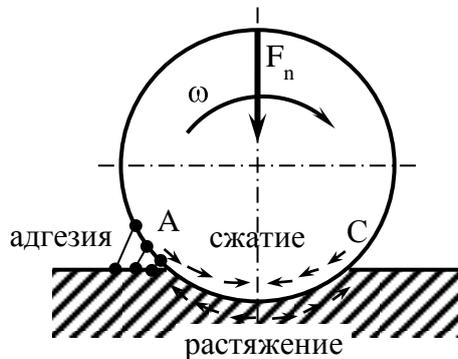


Рис. 41. Деформации поверхностных слоев при контактировании цилиндра и плоскости

Вклад проскальзывания в сопротивление качению зависит от отношения радиуса шара к радиусу желоба.

В зоне AC (см. рис. 41) при качении поверхности будут разделяться с разрывом адгезионных связей, действующих между катком и поверхностью в зоне выхода трущихся тел из контакта. Этим фактором

обусловлено проявление *адгезионной составляющей* F_3 в контактной зоне.

Вклад в сопротивление качению микропроскальзывания и адгезии мал. Большую часть составляют гистерезисные потери.

Факторы, влияющие на сопротивление качению.

Нормальная нагрузка – при качении тела по плоскости увеличение нормальной нагрузки вызывает монотонное повышение f_c (рис. 42) – зависимость близка к линейной. Это обусловлено одновременным ростом всех составляющих сопротивления качению: адгезионной (увеличение площади фактического контакта); проскальзывания (рост деформаций поверхностных слоев); гистерезисных потерь (увеличение доли пластических деформаций).

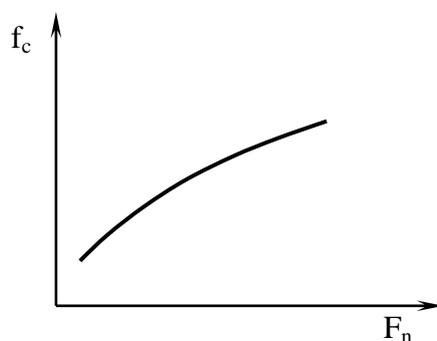


Рис. 42. Влияние нормальной нагрузки на коэффициент сопротивления качению

Смазка. При высоких нормальных нагрузках численное значение коэффициента сопротивления качению в значительной степени определяется наличием в зоне контакта оксидных или смазочных пленок, разделяющих сопрягаемые детали. При обильной смазке (кривая 1 на рис. 43) коэффициент сопротивления качению принимает при прочих равных условиях более низкие значения, чем при обедненной подаче смазочных в зону трения (кривая 2 на рис. 43). Химическая очистка поверхности (кривая 3 на рис. 43) способствует повышению адгезионной составляющей и проскальзывания, что повышает сопротивление качению.

При малых значениях нагрузки применение смазочного материала снижает коэффициент сопротивления качению незначительно (на 10–15%), чем больше смазки, тем меньше сопротивление. Незначительное влияние вызвано компенсацией снижения затрат на про-

скальзывание и адгезию, затратами на преодоление внутреннего трения в слое смазочного материала.

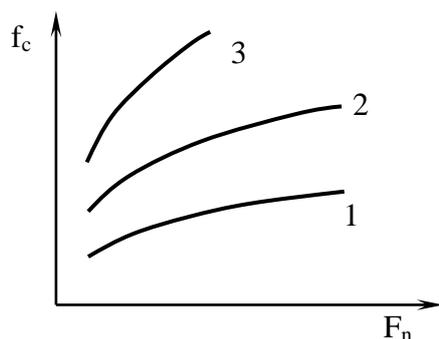


Рис. 43. Влияние нагрузки и наличия смазочного материала на коэффициент сопротивления качению

Размеры и форма тела качения. С увеличением радиуса тела качения R , в области малых его значений, сопротивление качению уменьшается (рис. 44) вследствие снижения гистерезисных потерь (больше радиус – меньше контактное давление, меньше доля пластических деформаций). С увеличением R в области больших значений преобладающим становится влияние адгезионной составляющей, которая растет с увеличением поверхности контакта.

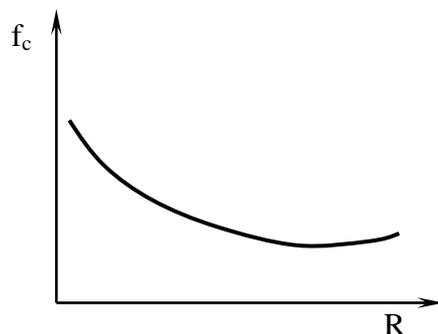


Рис. 44 Зависимость коэффициента сопротивления качению от радиуса катящегося тела

Рост поверхностной *температуры* приводит к снижению физико-механических свойств тел в зоне контакта, что вызывает увеличение гистерезисных потерь (увеличение доли пластического деформирования) и адгезионной составляющей (увеличение площади фактического контакта), следовательно, растет коэффициент сопротивления качению. Вид зависимости обуславливается зависимостью упругих свойств материалов тел от температуры.

Микротвердость. С увеличением микротвердости уменьшаются потери на проскальзывание и их деформацию, снижается глубина от-

носительного внедрения поверхностей трения, что приводит к уменьшению площади фактического контакта и адгезионного взаимодействия. В итоге снижается сопротивление трению качения

Увеличение *скорости* вызывает монотонное увеличение f_c . При этом эта зависимость менее существенна для качения цилиндра по цилиндру, чем шара по шару.

К важным факторам, определяющим сопротивление тел качению, также относятся: отклонение их от правильной геометрической формы, шероховатость поверхностей, структура материалов тел качения. *Макрогеометрические отклонения* поверхностей тел качения от идеальной формы тел вращения вызывают рост коэффициента сопротивления и снижают его стабильность. При переходе от *шероховатой* к гладкой поверхности плоского тела сопротивление качению уменьшается в 2–3 раза.

ИЗНАШИВАНИЕ ТРУЩИХСЯ ТЕЛ

Основные понятия о механизме изнашивания пар трения.

Пара трения – два узла машины, контактирующие поверхностями в условиях эксплуатации или испытаний (зубья ковша с землей – не пара трения).

Трение твердых тел или их контакт с движущейся газообразной или жидкой средой сопровождается изменением их линейных размеров. Изменение размеров может происходить как вследствие отделения с поверхностей небольших объемов материала, так и в результате пластического деформирования наиболее нагруженных выступов поверхности трения.

Изнашивание – процесс разрушения поверхностей твердого тела при механическом воздействии на него другого тела или среды, проявляющееся в изменении его размеров или формы (массы).

Износ – результат изнашивания, выраженный в единицах длины, объема, массы.

Интенсивность изнашивания (I_h) – отношение износа детали (или испытываемого образца) к пути трения или объему выполненной работы (при постоянной силе трения и скорости скольжения):

$$\text{линейная} - I_h = \frac{\Delta h}{L} = \frac{\Delta V}{A_a \cdot L} = \frac{\Delta M}{\rho \cdot A_a \cdot L};$$

$$\text{объемная} - I_h = \frac{\Delta V}{L};$$

$$\text{массовая} - I_h = \frac{\Delta M}{L},$$

энергетическая – объем изношенного материала, приходящийся на единицу работы силы трения: $I_w = \frac{\Delta V}{F \cdot L}$, F – сила трения.

При определении интенсивности изнашивания может оказаться более целесообразным относить износ к другому показателю, общему для всех узлов и агрегатов данной машины. Так, для автомобилей в качестве такого показателя может быть принято число километров пробега, а для тракторов – число гектаров пахоты.

Скорость изнашивания – отношение износа детали ко времени, в течение которого происходило изнашивание.

$$\text{линейная} - i_h = \frac{\Delta h}{\Delta t};$$

$$\text{объемная} - i_h = \frac{\Delta V}{\Delta t};$$

$$\text{массовая} - i_h = \frac{\Delta M}{\Delta t}.$$

Износостойкость (ε_u) характеризует сопротивление материала изнашиванию при заданных режимах трения, оценивают величиной, обратной интенсивности или скорости изнашивания.

Износостойкость реальных узлов трения может принимать значения в интервале 10^3 – 10^{13} . (Различают десять классов износостойкости от 3-го до 12-го, каждый из которых отличается по величине износостойкости от следующего в 10 раз. Номер класса соответствует минимальному показателю степени при ε_u).

При изучении сопротивления материалов абразивному изнашиванию чаще всего в лабораторных испытаниях используют понятие *относительной износостойкости*:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta h_0}{\Delta h},$$

Δh_0 – высота изношенного слоя эталона, Δh – высота изношенного слоя исследуемого материала.

Предельным износом детали (узла) называют износ, при котором дальнейшая эксплуатация становится невозможной, вследствие выхода детали (узла) из строя, неэкономичной или недопустимой, ввиду снижения надежности механизма.

Классификации видов изнашивания

Согласно ГОСТ 27674–88, все виды изнашивания можно разделить на три группы: механическое, коррозионно-механическое и электроэрозионное.

Механическое – разрушение поверхностного слоя твердого тела за счет его многократного деформирования. Механическое изнашивание включает виды: абразивное, усталостное, кавитационное, адгезионное, эрозионное.

Коррозионно-механическое – основной причиной являются химические процессы, инициируемые импульсным тепловым и механическим воздействием на материал. Коррозионно-механическое изнашивание включает виды: окислительное, водородное, фреттинг-коррозия.

Электроэрозионное – эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИДОВ ИЗНАШИВАНИЯ

Абразивное изнашивание

Абразивное изнашивание – механическое изнашивание материала детали в результате режущего или царапающего действия на него абразивных частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии, вызывающее изменение линейных размеров.

Абразивные частицы чаще всего бывают минерального происхождения, оксидами, продуктами износа или наклепанными металлическими частицами, имеют различную форму, часто острые грани или ребра.

Основной механизм их воздействия – резание или царапание.

Интенсивность абразивного изнашивания прямо пропорциональна твердости абразивных частиц и обратно пропорциональна твердости поверхности трения. Материалы высокой твердости обладают повышенной абразивной износостойкостью.

Абразивное изнашивание – один из наиболее распространенных видов изнашивания. Основным источником попадания абразивных частиц в сопряжения машин – окружающая среда.

Изнашивание о закрепленный абразив

Трение о закрепленный абразив (монолит) сопровождается изнашиванием металла и разрушением самого абразива путем дробления и скола частиц (рис. 45). Это обуславливает обновление изнашивающей способности абразива по отношению к металлу.

Если металл будет более твердым и прочным – разрушаться будет абразив, а наоборот – будет происходить резание и деформирование металла.

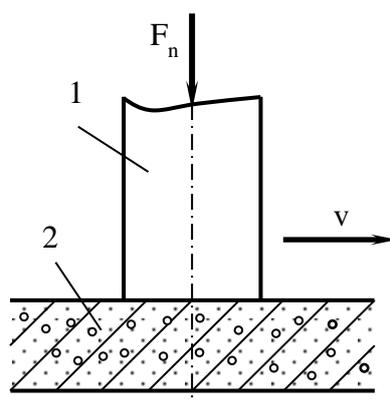


Рис. 45. Схема изнашивания индентора 1 об абразив 2

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

Абразивное изнашивание может перерасти частично в тепловое. При этих условиях применяют охлаждающие жидкости.

Изнашивание полимеров происходит по двум механизмам: микрорезание и усталость поверхностного слоя, повышение кристалличности и уменьшение эластичности приводит к снижению износостойкости материала.

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. 46).

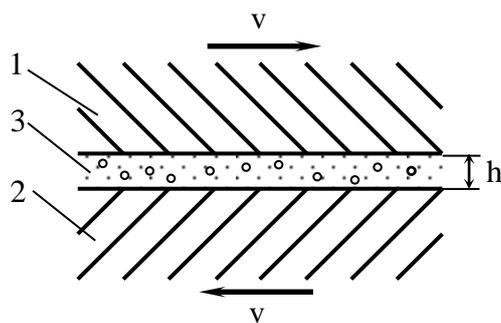


Рис. 46. Изнашивание металлических поверхностей в абразивной прослойке

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 или вращаться, вызывая на ней углубления, язвину или царапины.

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 трибосопряжения за счет охлаждающего и смазывающего действия жидкости. Эта среда также способствует выносу абразива из зазора. В этих случаях на из-

нашиваемой 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.

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. 47).

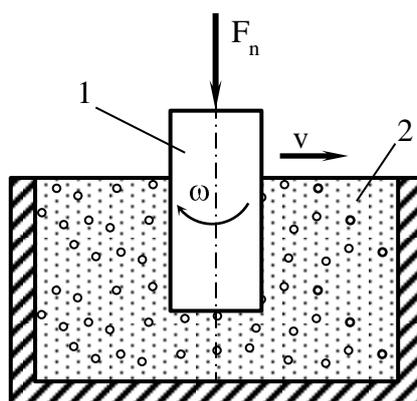


Рис. 47. Схема изнашивания образца 1 в абразивной массе 2

Абразивная частица будет совершать по поверхности детали перемещения, сопровождаемые микрорезанием или пластическим деформированием детали.

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 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.

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. 48).

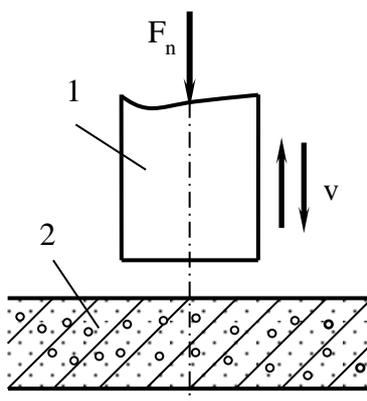


Рис. 48. Схема воздействия образца 1 при ударе по абразиву (монокристаллическому) 2

Прямое внедрение твердой частицы в образец под действием удара создает на нем углубление в виде лунки, приблизительно копирующее геометрию частицы.

Лунки образуются в результате локальной пластической деформации металла.

Этому разрушению подвергаются детали буровых долот, камне- и рудомелющих агрегатов, породоразрушающий инструмент пневмо- и гидроударников, детали гусеничного хода машин и др.

Газоабразивное изнашивание

Газоабразивное изнашивание – отделение с поверхности трения материала или его пластическое деформирование под воздействием твердых частиц, увлекаемых потоком газа.

Газоабразивному изнашиванию присуще изнашивание свободными абразивными частицами, увлекаемыми воздушным (газовым) потоком, гравитационными силами или центробежной силой в центробежных ускорителях абразивных частиц (рис. 49).

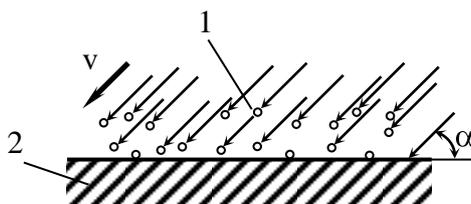


Рис. 49. Схема воздействия газобразивного потока 1 на изнашиваемую поверхность 2

Оно наблюдается на деталях пескоструйных аппаратов, струйных мельниц, компрессорах, промышленных вентиляторах, нагнетателях, деталях, эксплуатирующихся в запыленном потоке и т.д. Детали пневмотранспорта, газовых турбин, обшивка летательных аппаратов, лопатки вентилятора.

Наиболее сильное влияние на формирование процесса газобразивного изнашивания и его интенсивность оказывают энергетические факторы (скорость и масса частицы), а также угол атаки α .

При малых углах атаки ($\alpha \rightarrow 0^\circ$) наблюдается удар частиц со скольжением и в этом случае интенсивность изнашивания многих материалов близка к абразивному изнашиванию при скольжении по монолиту.

При углах атаки, близких к 90° , механизм абразивного изнашивания изменяется.

На многих деталях, подверженных газобразивному изнашиванию, образуется волнистая поверхность по направлению, перпендикулярному к вектору скорости потока твердых частиц.

Гидроабразивное изнашивание

Гидроабразивное изнашивание – это отделение с поверхности трения материала или его пластическое деформирование под воздействием твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости.

Интенсивность гидроабразивного изнашивания зависит скорости, массы частиц, угла атаки и др. с учетом разупрочняющего действия жидкой среды на поверхностный слой детали.

Этому виду изнашивания подвергаются трубопроводы, детали буровых установок, гидротурбин и многочисленного горнообогатительного оборудования (гидроциклонов, флотационных машин, сепараторов, пульпопроводов и др.).

Силовая схема взаимодействия частиц и среды с поверхностью детали такая же, как и при газобразивном изнашивании, т.е. решающую роль в этом процессе играет угол атаки. Так же, как и при га-

зоабразивном 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. Присутствие жидкости в зоне соударения абразивных частиц с поверхностью детали активизирует этот процесс за счет вымывания, очищения контакта от мелких абразивных частиц, а также за счет расклинивающего действия жидкости на микротрещины поверхности.

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 деталей. Однако при определенных значениях скорости гидроабразивного потока и давления, абразивное изнашивание в жидкости усиливается и усложняется кавитацией.

Металлы чувствительны к химической активности гидроабразивной среды.

Гидроабразивная износостойкость пластмасс ниже, чем металлов. Однако, увеличение угла атаки абразивных частиц приводит к повышению износостойкости полимеров. Особенно эффективно применение полимерных материалов при гидроабразивном изнашивании в агрессивных средах.

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 др.)

Относительное перемещение *металлических* тел при скольжении вызывает миграцию зон фактического контакта на поверхности каждого из них, в результате чего напряженное и деформированное состояние микрообъемов многократно меняется (рис. 50, а).

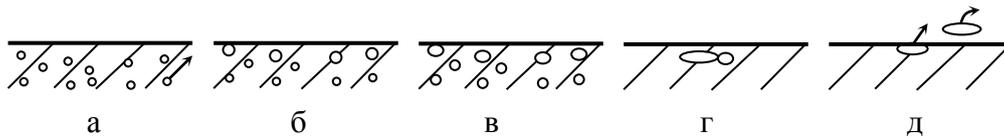


Рис. 50. Схема перемещения дефектов в зоне контакта изнашиваемого материала и образования частичек износа

Это вызывает накопление в локальных объемах на глубине поверхностного слоя различного рода дефектов: дислокаций, вакансий, несовершенств структуры, инородных включений и других концентратов напряжений (рис. 50, б, в). В дальнейшем происходит перемещение их к поверхности и развитие этих дефектов в микротрещины (рис. 50, г), которые смыкаются между собой и образуют частицы износа (рис. 50, д). В результате на рабочей поверхности детали появляются многочисленные раковины и углубления.

Разрушение *полимеров* происходит вследствие деструкции материала на локальных участках фрикционного контакта при больших скоростях или усталостное разрушение путем образования микротрещин (для кристаллических полимеров) при малых скоростях.

При увеличении нагрузки и температуры интенсивность износа возрастает.

Кавитационное изнашивание

Кавитационное изнашивание – процесс разрушения поверхностного слоя быстро движущейся с переменной скоростью жидкостью, содержащей пузырьки газа (каверны), которые схлопываются у поверхности тела.

На краях препятствий резко изменяется скорость течения, образуются разрывы и кавитационные образования, заполненные паром, которые, захлопываясь, создают ударные волны. Многократное ударное воздействие расшатывает кристаллы металлической поверхности, которые через некоторое время выкрашиваются.

Возникновение кавитации (переход элементарных объемов жидкости в парообразное состояние) происходит за счет резкого изменения давления, подвода температуры или другой энергии. В момент удара жидкость ведет себя как твердое тело.

Кавитация такого типа обычно наблюдается в гидравлических турбинах, трубопроводах, на лопастях гребных винтов, подводных крыльев судов и т.п. и называется *гидродинамической*. Кавитация мо-

жет возникнуть в жидкостях, которые подвергаются воздействию периодически изменяющегося давления, например в гидравлических насосах, клапанах, в системе смазки и охлаждения двигателей, подвергающихся вибрации, например, дизелей. В этом случае кавитация называется *вибрационной*.

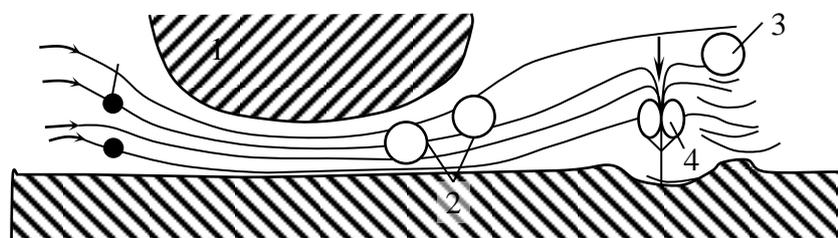


Рис. 51. Схема образования и схлопывания кавитационных каверн:
1 – ядро кавитации; 2 – кавитационные пузырьки; 3 – пузырек; 4 – разрушение пузырька.

В движущейся с большой скоростью потоке жидкости на участках сужения или наличия препятствий на его пути давление может снизиться до давления парообразования жидкости при данной температуре. При этом в отдельных микрообъемах жидкости могут произойти разрывы сплошности среды, образование пустот (1 на рис. 51) и заполнение их паром или газом с образованием кавитационных пустот (2 на рис. 51). Это приводит к возникновению микропузырьков размером порядка нескольких десятков микрон. После обтекания неровности скорость движения жидкости снижается, а статическое давление увеличивается. Происходит конденсация пара и растворение газа, сопровождающееся схлопыванием пузырька. Поверхность пузырька продавливается и в него с большой скоростью устремляются молекулы жидкости (4 на рис. 51).

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

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

Кавитационная стойкость металлов определяется их структурой и свойствами. С увеличением содержания углерода в сталях, при наличии легирующих добавок, при закалке и др. видах упрочнения стойкость к изнашиванию возрастает. При увеличении твердости износостойкость возрастает.

Полимерные материалы и эластомеры отличаются высокой износостойкостью. Эластомеры способны к большим упругим деформациям и поглощению энергии удара при схлопывании пузырьков.

Адгезионное (молекулярно-механическое) 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.

Сила адгезионного взаимодействия *зависит* от степени чистоты поверхностей, площади фактического контакта, природы материалов, нагрузки и температуры на контакте.

Различают два вида *заедания*:

– *холодное* – при высоких контактных давлениях на фактических пятнах касания, достигающих предела текучести материала и относительно малых скоростях скольжения. При холодном заедании, как правило, повышается коэффициент трения до величины 0,3–1,0, в результате чего может прекратиться относительное движение деталей машин. Холодное заедание характерно для тяжело нагруженных малоподвижных трибосопряжений, работающих в режиме граничного трения

– *горячее* – при высоких скоростях скольжения и температурах свыше 100–150°C. Горячее заедание характерно для высокоскоростных узлов трения, когда вследствие разрушения гидродинамической смазочной пленки происходит касание микровыступов тел и мгновенное повышение температуры поверхности. При горячем заедании процессы разрушения металлов локализуются 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. 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 одно-

именных 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.

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

При изнашивании полимеров основную роль играет химическая активность полимера по отношению к контртелу. При трении термопластов в результате нагрева до температур плавления на поверхности трения, происходит местное схватывание и как следствие – возрастает износ.

Эрозионное изнашивание

Эрозия – это процесс поверхностного разрушения вещества под воздействием внешней среды.

Эрозионное изнашивание – отделение с поверхности твердого тела частиц материала под воздействием потока жидкости или газа не содержащих абразивных частиц, приводящее к изменению линейных размеров.

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа, пара, воздуха складывается 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, деталях механизмов и устройств, предназначенных для очистки водой, газом высокого давления, резки материалов, дробления пород.

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

Чем ниже твердость материала на поверхности, тем больше износостойкость. Для пластических материалов на первой стадии наблюдается наклеп.

Окислительное изнашивание

Окислительное изнашивание – разрушение оксидных пленок, непрерывно возобновляемых в процессе трения, приводящее к изменению линейных размеров.

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.

Окислительное изнашивание состоит из трех этапов, которые циклически повторяются:

- деформирование и повышение активности материала (повышение развитости поверхности);
- образование вторичных структур (образование оксидных пленок в результате взаимодействия с кислородом);
- разрушение вторичных структур (за счет циклического нагружения и больших контактных давлений).

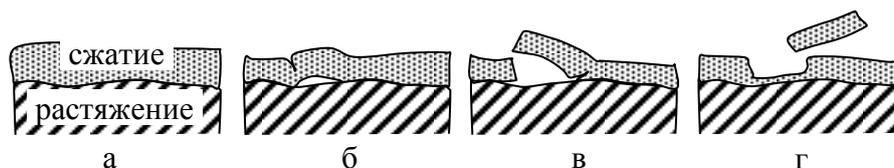


Рис. 52. Кинетика образования частиц износа при окислительном изнашивании

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 коррозионностойкие стали с повышенным содержанием хрома (12–15 %) и никеля (от 8 % и выше).

Другим эффективным средством является использование смазочных материалов с антикоррозионными присадками.

Водородное изнашивание

Водородное изнашивание выражается в повышении концентрации такого окислителя, как водород, в поверхностных слоях деталей трибосопряжений с последующим процессом их интенсивного разрушения.

Внедряясь через поверхностные дефекты внутрь металла, водород в атомарном состоянии 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.

Водородное изнашивание зависит от концентрации водорода в поверхностных слоях трущихся деталей.

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 учитывать их склонность к наводороживанию и, соответственно, охрупчиванию.

Введение в сталь хрома, титана, ванадия снижает проникновение в нее водорода. Наклеп стали может увеличивать поглощение водорода.

Необходимо, где возможно, исключать из узлов трения полимеры, способные к быстрому разложению и выделению водорода.

В качестве присадок к смазочным жидкостям и фрикционным полимерным материалам могут быть введены кремний и органические соединения (силаны), содержащие несколько атомов хлора, которые легко соединяются с выделившимся водородом.

Коррозию в узлах трения можно уменьшать путем изменения режимов работы: снижением температуры, скорости скольжения и давлений.

Фреттинг-коррозия

Самой агрессивной формой окислительного износа является фреттинг-коррозия (англ. Fret – разъедать).

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

При фреттинг-коррозии циклические микроперемещения в контакте вызывают локальные тепловые флуктуации, многократное пластическое деформирование с образованием мостиков сварки (1 на рис. 53). Сдвиг трущихся поверхностей вызывает разрушение этих мостиков и отрыв микроскопических частиц металла с поверхности одного из трущихся тел. В областях адгезионного отрыва частиц образуются каверны 2 малых размеров (рис. 53). Поверхность каверны окисляется, в ее объемах скапливаются частицы и происходит их интенсивное окисление. Продукты окисления заполняют каверны и вызывают абразивное изнашивание ее поверхности. Это приводит к образованию поверхностных и подповерхностных усталостных трещин, их развитию и откалыванию малых частиц металла. Некоторые каверны могут объединяться (3 на рис. 53) и процесс в них продолжается.

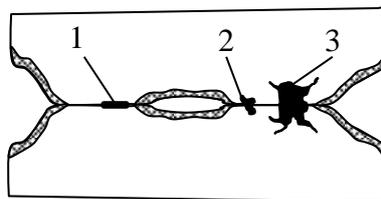


Рис. 53. Схема изнашивания металлов при фреттинг-коррозии:
1 – мостики сварки; 2 – каверны малых размеров; 3 – большие каверны.

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.

Фреттинг-коррозии подвергаются: посадки с гарантированным натягом, шлицевые, шпоночные, болтовые соединения, соединения при помощи заклепок, рессоры, пружины и др. детали, работающие в динамически напряженных условиях.

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.

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

Избирательный перенос. Эффект безызносности

Известна еще одна разновидность изнашивания, при которой напротив наблюдается аномально низкий износ деталей. Этот вид износа условно называют *безызносностью* или избирательным переносом.

Явление избирательного переноса нельзя отнести к самостоятельному виду изнашивания. Скорее это физико-химический метод повышения износостойкости пар трения, представляющий собой процесс образования и непрерывного возобновления на поверхности трения пленки меди, обладающей низким сопротивлением сдвигу.

Наблюдается в узлах трения, одним из элементов которых являются сплавы или композиты, содержащие медь или ее соединения, а в качестве смазочного материала служат глицерин или другие вещества, способные восстанавливать медь из оксидов.

При трении в таких парах на стальной поверхности возникает мягкий, близкий к аморфному состоянию слой меди. При этом в процессе трения происходит взаимный, непрерывающийся перенос атомов меди с одной поверхности на другую, а пленка меди на стали постоянно возобновляется.

Избирательный перенос обеспечивает многолетнюю эксплуатацию узлов трения без заметного изнашивания. В таком режиме, например, работают компрессоры бытовых холодильников.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Кинетика изнашивания трибосистем

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. 54).

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

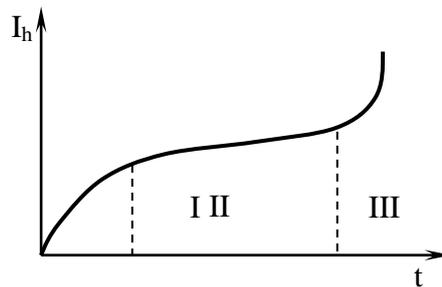


Рис. 54. Влияние времени эксплуатации на интенсивность изнашивания деталей машин (кривая В. Ф. Лоренца)

Период приработки (I) характеризуется повышенным тепловыделением, изменением микрогеометрии поверхностей и интенсивным отделением с поверхности трения продуктов износа. Это неравномерная стадия изнашивания твердых тел, которая характеризуется переменной интенсивностью изнашивания. С течением времени интенсивность изнашивания снижается, приближаясь к некоторой постоянной величине. В этот период изменяется микрогеометрия поверхностей трения сопрягаемых тел, трансформируется структура и изменяются свойства поверхностных слоев.

Экспериментально установлено, что в различных условиях и различных парах трения после приработки устанавливается одинаковая, равновесная шероховатость, характерная для определенных материалов (рис. 55).

Установлено, что новая равновесная микрогеометрия поверхностей трения после приработки мало зависит от исходной геометрии. В большей степени она определяется режимами нагружения, структурой и свойствами трущихся тел.

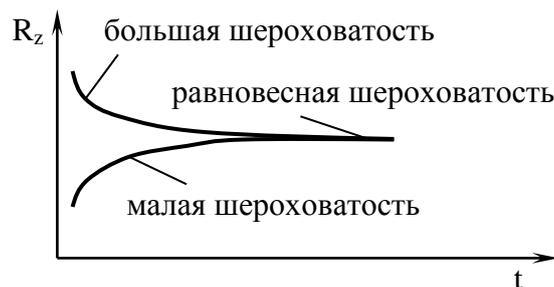


Рис. 55. Влияние времени эксплуатации на усиановление равновесной шероховатости

В процессе приработки изменяются и макрогеометрические характеристики узла трения. При длительной приработке и высокой интенсивности изнашивания в этот период возможно образование зазоров, величина которых больше допустимого значения для данной пары трения. Это приводит к росту давления и температуры в зоне контакта и снижает длительность периода установившегося изнашивания. Чем ближе исходная деталь по топографии поверхности трения и структуре поверхностных слоев к детали, работающей в условиях установившегося изнашивания, тем более высокой может быть ее долговечность. Период приработки необходимо проводить при сравнительно легких режимах нагружения (нагрузка, скорость скольжения, температура в зоне контакта).

Период установившегося изнашивания (II) характеризуется постоянной 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. В этот период происходит непрерывное восстановление деформируемых и разрушаемых участков поверхности трения. Микрогеометрия и свойства ранее существовавших и вновь создаваемых участков поверхности трения существенно не различаются.

Период интенсивного (катастрофического) изнашивания (III) — это период, когда на износые отказы накладываются коррозионные, усталостные процессы и процессы старения материала. Это практически предаварийное (аварийное) состояние трибосопряжений или машины.

Постепенное изнашивание сопрягаемых деталей сопровождается ростом зазоров, ухудшением условий смазки и усилением динамических нагрузок. Это вызывает неравномерный износ материала по поверхности трения. Появляются макрогеометрические отклонения

(овальность, конусность, волнистость и др.). При дальнейшем нагружении эти отклонения становятся причиной повышения интенсивности изнашивания. Часто этот период заканчивается катастрофическим изнашиванием и объемным разрушением деталей узла трения.

Способы повышения износостойкости

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 основные группы: конструкционные, технологические, материаловедческие и эксплуатационные.

Конструкционные способы повышения износостойкости

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.

Выбор материала.

Применение материалов для изготовления деталей узла трения сложная задача. Выбор должен осуществляться с учетом большого количества факторов: уровень статической и динамической нагрузок, скорость относительного перемещения, температура эксплуатации, свойства смазочного материала и сопрягаемого тела, вид трения, конструкция узла и др.

Наиболее важным требованием является *рациональное сочетание или учет совместимости материалов сопрягаемых тел*. Должна быть исключена возможность схватывания поверхностей, образование адгезионных связей.

Не рекомендуется сочетать в трибосопряжений мягкий материал с мягким (алюминиевый сплав – мель, медный сплав – свинец и т.д.) и одноименные по природе материалы (медь – медь, бронза – бронза, титан – титан).

Наоборот, рекомендуется сочетать твердый материал с мягким, что обеспечивает высокую долговечность узла трения при низких нагрузках и температуре. 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.

Выбор материала необходимо проводить с учетом не только твердости, но и площади поверхности трения. Установлено, что более износостойкой является *обратная пара трения* (по поверхности с большей площадью скользит более мягкое тело). В случае *прямой пары трения* (по поверхности мягкого материала с большой площадью скользит тело из твердого материала, имеющее малую поверхность трения) интенсивность изнашивания более высокая. Из-за трудностей технологического характера этот прием реализуется довольно редко.

Оптимизация макрогеометрии поверхностей трения.

Этот метод направлен на достижение возможно более равномерного распределения напряжений в зоне контакта, снижение фрикционного нагрева и разделение поверхностей трения слоем смазочного материала.

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.

Таким образом, при выборе формы сопрягаемых деталей руководствуются несколькими принципами:

- изначально поверхности трения должна задаваться такая форма, какую она имеет в период установившегося трения;
- сопрягаемые детали должны иметь форму, близкую к идеальной;
- выбирать оптимальную волнистость;
- придание детали такой форма, при которой по мере износа одних участков поверхности трения в контакт вступают соседние, менее изношенные.

Выбор наиболее оптимальной схемы машины.

К числу конструктивных способов относится и выбор наиболее оптимальной принципиальной схемы машины (механизма) с учетом повышения износостойкости деталей. Конструкторская практика показывает, что, выбирая принципиальную схему, необходимо:

- 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 трибосопряжениях.

Замена внешнего трения на внутреннее трение.

При малых линейных или угловых перемещениях трущихся тел применим принцип замены внешнего трения внутренним. Для реализации этого принципа между двумя движущимися относительно друг друга телами размещают эластичный элемент, жестко закрепленный с их поверхностями. При перемещении тел эластичный элемент испытывает циклические знакопеременные деформации, амплитуда и асимметрия цикла которых определяют его долговечность. 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.

Рациональный выбор вида трения.

Потери энергии в условиях трения скольжения значительно выше, чем при реализации трения качения. Поэтому необходимо там, где это возможно, использовать в конструкции узлов трения опоры качения.

Применение *опор качения* наиболее оправдано в узлах трения, эксплуатирующихся при малых и средних нагрузках и скоростях, отсутствии химически активных веществ, вибраций и ударных нагрузок. Нерационально их применять при реверсивном движении тел с малыми углами поворота. Применение опор качения требует подачи смазочного материала в зону трения, высокой точности изготовления и монтажа деталей подвижных сочленений. Существенным недостатком опор качения являются большие габаритные размеры.

Применение опор скольжения возможно в широком интервале нагрузок и скоростей, в несмазываемых узлах трения, не требует высокой точности изготовления. Они менее чувствительны к вибрациям, ударным нагрузкам и воздействию абразивсодержащих химически активных сред. К основным недостаткам опор скольжения относятся высокие коэффициенты трения и интенсивность изнашивания, износ сопрягаемой поверхности, зависимость триботехнических характеристик от температуры.

Снижение тепловой нагруженности контакта.

Наличие температурных градиентов по касательной и нормали к поверхности трения приводит к возникновению высоких температурных напряжений, изменению зазоров и рельефа поверхности трения. В итоге возможно схватывание поверхностей, заедание и заклинивание подвижного сопряжения.

Меры борьбы с этим явлением включают:

- расчет зазоров с учетом величины температурных деформаций элементов узлов трения;
- выбор материалов с близким значением коэффициентов теплового расширения;
- применение схем контактирования с оптимальным коэффициентом трения;
- реализацию средств теплозащиты и теплоотвода.

Технологические способы повышения износостойкости детали

Технологические способы снижения интенсивности изнашивания направлены на достижение оптимальной топографии поверхности трения, обеспечение низкого сопротивления сдвигу на границе раздела трущихся тел и улучшение структуры поверхностного слоя изнашиваемого тела.

Формирование оптимальной топографии.

Для каждого узла трения и определенных режимов его эксплуатации характерна своя оптимальная топография сопрягаемых поверхностей, при которой наблюдается минимальная интенсивность изнашивания. Она устанавливается в процессе приработки независимо от исходной микрогеометрии. Чем ближе исходная микрогеометрия к равновесной, тем меньше период приработки. Для деталей узлов трения в

определенных режимах работы необходимо обеспечить непрерывное существование смазочной пленки в зоне контакта.

Поэтому разработан ряд технологических приемов создания на поверхности трения *карманов смазки*:

– с помощью абразивного инструмента создается сетка редко расположенных глубоких канавок;

– обкатка деталей роликами, шариками или алмазным инструментом.

В период перехода от трения покоя к трению скольжения смазочный материал выдавливается из канавок и частично восполняет его недостаток в зоне трения.

Нанесение защитных покрытий.

Наиболее перспективным методом повышения износостойкости является нанесение защитных покрытий на поверхность трения деталей. Для этого используют материалы, обладающие высокой адгезионной способностью к детали, низким сопротивлением сдвигу и способностью выдерживать без разрушения многократные деформации.

К ним относят: мягкие металлы (медь, олово, свинец и т.п.), твердые смазочные материалы (графит, диселениды и дисульфиды металлов) и композиты на основе полимеров. Особое внимание заслуживают покрытия, представляющие собой пористый каркас, например из меди, поры которого заполняются сухим смазочным веществом.

Для тяжело нагруженных узлов трения используют детали, на поверхности которых сформирована пленка из твердых материалов типа нитрид титана, оксид алюминия, карбиды и бориды, покрытия на основе металлов или полимеров, содержащих ультраалмазы (частицы синтетических алмазов размером 4–8 нм).

Покрытия наносят электролитическим осаждением, напылением, окунанием, припеканием, электромагнитной наплавкой и др.

Облучение потоками энергии высокой плотности.

Для повышения износостойкости деталей используют лазерное легирование тонких поверхностных слоев металлов и сплавов, локальную поверхностную закалку сталей, лазерное упрочнение титановых сплавов путем оксидирования поверхностного слоя и снижения их наводороживания в процессе трения.

Так же производят ионную бомбардировку, обработку электронным лучом, радиационное облучение (для деталей из полиэтилена), ионную имплантацию, ионно-лучевое перемешивание.

Химико-термическая обработка поверхности.

Этот метод позволяет изменять структуру и свойства поверхностного слоя металлов путем насыщения его атомами легирующих элементов в процессе тепловой обработки в химически активной среде.

В зависимости от вида легирующего элемента различают: цементацию, азотирование, сульфоцианирование, силицирование, оксидирование, фосфатирование, сульфидирование, хромирование и др.

Цементация – насыщение углеродом поверхностного слоя малоуглеродистых (до 0,3%С) сталей. Этот слой толщиной 0,5–2,3 мм становится более твердым, но в нем возникают значительные внутренние напряжения, что снижает эффективность метода.

Азотирование – насыщение поверхностного слоя деталей из черных металлов азотом. Азот диффундирует в металл и образует с легирующими элементами нитриды. Это повышает твердость поверхности и увеличивает износостойкость в 8–10 раз.

Силицирование – насыщение черных металлов кремнием на глубину 0,3–1 мм. Повышается стойкость к изнашиванию и воздействию химически активных сред. Однако поверхностный слой становится хрупким, обладает высокими внутренними напряжениями и трудно обрабатывается.

Оксидирование – процесс образования оксидной пленки толщиной до 3 мкм на поверхности металлической детали. На поверхности стали образуется пористый поверхностный слой из мельчайших кристаллов FeO с низкой твердостью. Этот слой прочно соединен с основным металлом, обладает низким сопротивлением сдвигу и способен удерживать в своем объеме смазочный материал.

Фосфатирование – образование на поверхности изделий из черных и цветных металлов пленок толщиной до 50 мкм из нерастворимых фосфорнокислых солей. Пленка обладает высокой стойкостью к воздействию активных веществ и изнашиванию, имеет высокую пористость и твердость.

Сульфидирование – насыщение поверхностного слоя серой, процесс сопровождается образованием сульфида и дисульфида железа. Слой обладает высокой адсорбционной активностью, низким сопротивлением сдвигу и обеспечивает высокую износостойкость детали.

Сульфоцианирование – метод упрочнения деталей при их тепловой обработке в ванне, содержащей соли серы, азота и углерода. Поверхностный слой содержит нитриды, карбиды и сульфиды железа.

В качестве *термообработки* применяется поверхностная закалка:

- *пламенная* – нагрев поверхности детали газовыми горелками (газовая среда – смесь кислорода с ацетиленом) или при помощи плазмотрона (устройство, генерирующее плазму);
- *поверхностная закалка* с контактным нагревом тока от понижающего трансформатора (сварочного).
- *ТВЧ-закалка* – индуктор с охлаждением;
- *закалка с нагревом* в электролите.

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 удается исключить контакт наплавленного металла с кислородом воздуха. Для этого процесс проводят в среде углекислого газа, аргона и их смесей.

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.

Главным достоинством метода напыления является его универсальность – независимость от природы материала детали.

Напыление не оказывает заметного теплового воздействия на основу. Напыляют цветные металлы и сплавы, стали, твердые сплавы и керамику, пластмассы и т.п. Напыление широко применяется для восстановления формы изношенных деталей.

Механическое упрочнение поверхностей.

Это один из простых и наиболее экономичных способов упрочнения деталей машин. Этот метод чаще называют пластической деформацией. Он основан на использовании в качестве деформирующих тел роликов, шариков, струи из мелких стальных или стеклянных шариков, а так же сферических алмазных наконечников. Помимо упрочнения поверхность детали выглаживается, снижается ее шероховатость.

Все это повышает усталостную износостойкость и прочность детали, снижает срок приработки.

Материаловедческие способы повышения износостойкости

Эти методы направлены на создание новых износостойких материалов, оптимальное сочетание механических, химических и теплофизических свойств которых обеспечивает низкие коэффициент трения и интенсивность изнашивания при требуемых режимах нагружения.

Оптимизация макроструктуры материалов.

Макроструктура или конструкция материала играет важную роль в обеспечении долговечности узла трения. В зависимости от режимов нагружения используют материалы блочные, ленточные, многослойные, армированные и с плавно изменяющимися по толщине свойствами (интегральные).

Детали *однородной макроструктуры* (блочные) выполняются из одного материала. Выбор типа и состава материала определяется конкретными условиями эксплуатации, свойства такого материала являются изотропными.

Ленточные материалы обладают рядом преимуществ. Они в меньшей степени зависимы от коэффициентов температурного расширения и теплопроводности, позволяют уменьшить габариты узла трения и расход дорогостоящих материалов, технологичны. Наиболее эффективно применение ленточных материалов в узлах трения с ограниченной смазкой. Чаще всего используют ленты из биметаллов и многослойные. Широко распространены ленты из порошковых материалов, нанесенных в виде тонкого слоя на стальную основу. Пористый слой может заполняться жидким или твердым смазочным материалом, полимерами.

Триботехническими характеристиками материала можно управлять, изменяя их *пористость*. Поры выполняют роль резервуаров для смазочного материала, который по мере износа материала выдавливается из его объема и поступает в зону трения. Наиболее эффективно получение пористых материалов спеканием из порошков (порошковая металлургия).

Одним из методов улучшения макроструктуры материалов является их *армирование*. Наиболее распространен этот метод при создании композитов на основе полимеров. Он направлен на устранение наибо-

лее существенного недостатка полимеров – низких нагрузочной способности и теплопроводности. Для армирования широко используют стеклянные, металлические, асбестовые, арамидные и базальтовые волокна.

Управление микроструктурой материалов.

Основано на зависимости износостойкости и механических свойств металлов от размера зерна, кристаллографической текстуры, а для полимеров – от степени кристалличности, размеров и типа надмолекулярных образований. Изменение микроструктуры материалов достигается термической обработкой, выбором режимов формования детали, воздействием потоков энергии высокой плотности, введения активных наполнителей и модификаторов.

Эксплуатационные способы повышения износостойкости.

Долговечность узлов трения машин и механизмов в значительной мере зависит от условий их эксплуатации, соблюдения норм, направленных на снижение интенсивности изнашивания трущихся тел, своевременности проведения профилактических мероприятий, замены или восстановления изношенных деталей. Рассмотрим наиболее широко применяемые эксплуатационные методы обеспечения высокой износостойкости узлов трения.

Обкатка машин и механизмов.

Данный метод предназначен для одновременной приработки всех узлов трения, входящих в состав машины, создания равновесной шероховатости. Обкатку производят, как правило, при пониженной нагрузке, обильной смазке, с обязательным контролем температуры в парах трения. Применение специальных прирабочных смазок, имеющих в своем составе ПАВ, позволяет сократить время приработки и уменьшить износ в этот период. За время приработки коэффициент трения уменьшается и постепенно стабилизируется. Окончание процесса приработки можно установить по стабилизации коэффициента трения и температуры. Обкатку чаще проводят на специальных стендах.

Организация смазки узлов трения.

Это одна из наиболее эффективных мер продления срока службы трибосистем. В процессе эксплуатации машин и механизмов происходит утечка и старение смазочных материалов, они теряют свои сма-

зочные свойства, насыщаясь продуктами износа и разрушая. Это приводит к необходимости периодической фильтрации и (или) замены смазочного материала.

Применение смазочного материала после истечения срока его замены приводит к повышенному износу элементов узла трения. Преждевременная замена смазочного материала также нецелесообразна.

Период эксплуатации смазочного материала до полной замены зависит от его свойств, конструкции узла трения, условий и режимов эксплуатации. Важной мерой в организации смазки является очистка деталей и смазочной системы от шлаков.

Выбор режимов эксплуатации.

Важным условием предупреждения интенсивного изнашивания узлов трения является *исключение перегрузок*. Превышение допустимых нагрузок или скорости скольжения приводит к нарушению теплового режима работы узла трения, вытеканию смазочного материала из зоны трения и интенсивному износу трущихся тел.

В значительной мере долговечность трибосопряжений определяется частотой и правильностью выполнения *запуска машины*. Именно в пусковой период износ деталей является наиболее интенсивным. В период запуска нагрузка должна повышаться плавно и достигать требуемого значения в момент стабилизации теплового состояния узла трения.

Диагностика и ремонт узлов трения.

Замена или восстановление изношенных деталей осуществляются после достижения ими предельно допустимого износа, который определяется по техническому, функциональному или экономическому критерию.

Согласно *техническому* критерию, предельному износу детали соответствует начало резкого увеличения коэффициента трения, интенсивности изнашивания, температуры, вибрации или изменение выше допустимого значения размеров детали. Оценка по техническому критерию требует непрерывной или периодической диагностики изнашивания подвижных сопряжений или анализ проб масла.

В основу *функционального* критерия положено изменение функций, выполняемых узлом трения или машиной. Это потеря мощности двигателя, снижение точности обработки изделия на металлорежущем станке, снижение давления на выходе компрессора, появление или

рост утечки рабочей жидкости или смазочного материала в различных механизмах и т.п.

В качестве *экономического* критерия могут служить производительность машины, затраты на выпуск единицы продукции.

Ремонт узлов трения осуществляется как после достижения ими допустимого износа, так и после превышения ими предельного срока службы, определяемого нормативными документами.

ТРИБОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. МАТЕРИАЛЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ.

Триботехническое материаловедение (трибоматериаловедение) представляет раздел науки о строении и свойствах материалов и является связующим звеном между результатами трибологических теоретических исследований и комплексом знаний, составляющих основы триботехники.

Важными *материаловедческими задачами* являются:

– установление взаимосвязи между физико-химическими закономерностями трения (износа) и триботехническими свойствами материалов (коэффициентом трения и износостойкостью), а также структурным составом трибоматериалов;

– рациональный выбор материалов изнашиваемых деталей с учетом их эксплуатационных свойств;

– управление структурообразованием и механическими свойствами материалов с целью уменьшения трения и износа.

Технические требования к конструкционным материалам трибосистем обусловлены, прежде всего, характером подвижности соединений. Различают *неподвижные и подвижные соединения* (трибосопряжения).

Технические требования к материалам элементов *неподвижных соединений* обычно предъявляются к *прочностным свойствам* самих элементов и к их способности надежно контактировать в сопряжении. Эти требования, как правило, обеспечиваются при достаточных прочности и коэффициенте трения покоя (статическом коэффициенте трения) в условиях химической совместимости (минимальная диффузионная подвижность, незначительное различие электрохимических потенциалов и т.п.) элементов соединения. В отдельных случаях применяются прокладки с целью увеличения прочности сцепления, жесткости или герметичности.

Характерным признаком неподвижных соединений является то, что при выполнении перечисленных требований они практически не изнашиваются.

К материалам подвижных соединений предъявляются более жесткие и многообразные требования, обусловленные конструкционным многообразием узлов трения и отличиями в условиях их работы в машинах.

В связи с этим в каждом конкретном случае выбора конструкционных материалов для трибосопряжения выделяются основные *факторы, которые должны быть учтены*: нагрузочные характеристики (контактное

давление, скорость скольжения), заданный технический ресурс (общая продолжительность работы узла трения в часах), температурные условия эксплуатации, наличие и вид смазочного материала, характер окружающей среды (атмосферный воздух или инертный газ и их влажность, вакуум), коэффициент (момент) трения, экономические и технические возможности использования материала, ограничения по массе узла трения, радиационная стойкость материалов и др.

Характерный признак подвижных соединений – материалы подвижных соединений изнашиваются.

В инженерной практике *материалы* принято различать по функциональному назначению и по их работоспособности в зависимости от фрикционной совместимости. Выбор конструкционного материала трибосопряжения решается двумя путями:

- применение традиционных «триботехнических материалов» (чугуны, бронзы и др.), которые удовлетворяют многообразию технических требований в определенных рамках;

- создание триботехнических материалов с дифференцированно повышенными триботехническими свойствами применительно к конкретным условиям эксплуатации.

Классификация триботехнических материалов

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

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 значение 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 ($\alpha \ll 1$).

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

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.

Антифрикционные материалы

Антифрикционными называются материалы, которые при трении даже в тяжелых условиях нагружения имеют сравнительно небольшой коэффициент трения и мало изнашиваются.

Антифрикционные материалы используются при создании подвижных соединений с низким трением и высокой износостойкостью: подшипников качения и скольжения, шарнирных соединений, направляющих для ползунов, эксцентриковых и кулачковых механизмов и т.д.

К *свойствам* антифрикционных материалов предъявляются следующие требования:

- низкий коэффициент трения;
- способность в процессе приработки создавать микрорельеф истираемой поверхности;
- способность к поглощению твердых частиц (шаржироваться);
- малая склонность к схватыванию (адгезии).

Для обеспечения этих свойств *структура* антифрикционных материалов должна быть *гетерогенной*, состоящей из мягкой и пластичной основы и включений из более твердых частиц. При скольжении твердые частицы обеспечивают сопротивление изнашиванию, а мягкая основа, прирабатываясь к контртелу (валу), образует микрорельеф из выступающих твердых включений, пор и впадин шероховатости, создающих как бы «капиллярные ходы» для циркуляции смазочного материала и выноса продукта износа.

Существуют следующие *виды антифрикционных материалов*:

- металлические,
- природные,
- полимерные,
- самосмазывающиеся композиции,
- металлокерамические.

Металлические антифрикционные материалы

– 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 применяются для вкладышей подшипников баббиты типа Б-83 (83% олова, остальные – сурьма и медь), они очень хорошо прирабатываются и имеют коэффициент трения $f \approx 0,005$ со смазкой.

– сплавы на основе меди:

– *бронза* – это сплав меди с оловом. Бронзы до настоящего времени являются основными материалами тихоходных подшипников скольжения, венцов червячных зубчатых колес.

– *латунь* – сплав меди с цинком. Латунни используются реже.

– сплавы на алюминиевой основе имеют два вида добавок: тугоплавкие (хром, железо, марганец, кремний) и легкоплавкие (олово, сурьма, свинец, кадмий, магний).

Преимуществами этих сплавов являются невысокая стоимость, прочность, хорошая теплопроводность, высокая коррозионная стойкость и низкая плотность.

Недостатки сплавов на алюминиевой основе – значительный коэффициент теплового расширения и способность к схватыванию.

В последние годы разработаны сплавы на основе алюминия с высоким содержанием свинца или олова. Такие сплавы обладают низким схватыванием и достаточно высокой задиростойкостью.

– чугуны. 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* применения чугунов – низкая износостойкость и высокий коэффициент трения, поэтому они применяются в малоответственных узлах трения при низких нагрузках и скоростях скольжения.

Чугуны находятся на границе фрикционных и антифрикционных материалов.

Природные антифрикционные материалы

К числу природных антифрикционных материалов относятся:

– древесина. В чистом виде древесина применяется редко, обычно она пропитывается различными смазками и после пропитки прессуется. *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.

Преимущества пропитанной древесины – легко прирабатывается, мало изнашивается, самосмазывается, имеет невысокую стоимость. *Недостатки* – низкая твердость и теплопроводность, набухает, впитывает влагу.

Металлизация древесины обычно сочетается с пропиткой полимерными смолами. Разработанные композиционные материалы на основе древесины имеют низкий и устойчивый коэффициент трения, малый износ.

– драгоценные камни и т. д. Драгоценные камни успешно применяются в качестве опор скольжения в часовой промышленности. Они имеют низкий коэффициент трения и высокую износостойкость.

Полимерные антифрикционные материалы

Полимерные антифрикционные материалы изготавливаются на основе полиамидов и карбоцепных полимеров, фенолформальдегидных и эпоксидных смол, фторопласта.

Применение пластмасс позволяет увеличить надежность и ресурс машин, улучшить их эксплуатационные, технико-экономические характеристики и технологичность, отказаться от дефицитных сплавов цветных металлов и снизить стоимость машин.

Полимеры применяются в трибологии благодаря таким *характерным свойствам*, как инертность ко многим реактивам; относительно низкая склонность к схватыванию; самосмазывающие свойства и низкий модуль упругости.

Полимеры (термопластичные и терморезистивные) могут использоваться в качестве антифрикционных материалов, как в чистом виде, так и в виде *композиционных материалов* с различными наполнителями.

Из полимерных материалов изготавливают зубчатые колеса, шкивы, трущиеся элементы подшипников скольжения, кулачковых механиз-

мов, направляющих, уплотнений, сепараторы шарикоподшипников, втулки шарниров и т.д.

Термопластичные материалы

Антифрикционные материалы на основе термопластов отличаются высокой технологичностью, низкой себестоимостью, хорошие демпфирующие свойства. Детали из термопластов изготавливают высокопроизводительными методами – литьем под давлением и экструзией; крупногабаритные детали – центробежным литьем, ротационным формованием, нанесением антифрикционных покрытий из расплавов, порошков, дисперсий.

В качестве *антифрикционных термопластичных* материалов наиболее широко используют:

– *полиамиды* (капрон, П68, П6, П12 и др.), обладают низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью и работающие при температуре от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

К *недостаткам* полиамидов следует отнести их относительно высокое водо- и маслопоглощение. Деталям из полиамидов свойственна хорошая сопротивляемость воздействию циклических нагрузок, возможность работы без смазки в паре с закаленной сталью. Коэффициент трения полиамидов по стали без смазки 0,1–0,2, со смазкой маслом – в пределах 0,05–0,10.

Для повышения механических свойств полиамиды *армируют* волокнистыми и другими материалами (мелкорубленное стекловолокно или измельченное углеродное волокно), а для улучшения антифрикционных свойств в них вводят различные *твердосмазочные графитоподобные* компоненты (графит, дисульфид молибдена, тальк, термоантрацит).

Температурный коэффициент линейного расширения и водопоглощение наполненных полиамидов в 1,5–4,0 раза меньше, коэффициент трения без смазки в 1,2–2,0 раза больше, а интенсивность изнашивания в 2–5 раз ниже, чем у ненаполненных полиамидов. Полиамиды применяют также в качестве тонкослойных покрытий металлических деталей.

– *ароматические полиамиды* (фенилон) применяются для изготовления деталей узлов трения, как в чистом виде, так и в виде *композиционных материалов*, наполненных фторопластом, графитом, дисульфидом молибдена и другими твердыми смазочными материалами.

Детали из ароматических полиамидов отличаются высокой прочностью и теплостойкостью, их изготавливают методами компрессионного и литьевого прессования.

Фенилон используют для изготовления подшипников скольжения, подпятников, уплотнений, зубчатых колес, сепараторов шарикоподшипников, деталей клапанов, кулачков и т.д.

– *фторопласты*. В приборо- и машиностроении для изготовления деталей узлов трения широко применяют *фторопласты* и *композиционные материалы* на их основе.

Фторопласты отличаются высокой химической стойкостью, высокой температуростойкостью (до 300 °С), а также сохраняют работоспособность, не охрупчиваясь при охлаждении до –250 °С. На фторопласты практически не действуют кислоты, окислители, щелочи, растворители. Коэффициент трения фторопластов, особенно фторопласта-4 (0,03–0,05) находится на уровне значений коэффициента трения металлических пар в гидродинамическом режиме скольжения.

Применение фторопластов в чистом виде без наполнителей весьма ограничено вследствие низкой прочности и износостойкости. В машиностроении используются в основном *композиционные материалы*. Введение различных *наполнителей* (кокс, графит, дисульфид молибдена, металлические порошки, стекловолокно, углеродное волокно) в количестве 15–45% по массе позволяет значительно повысить прочность и износостойкость (в 10–100 раз и более).

Использование фторопластов в виде лаков, паст, суспензий для изготовления антифрикционных наполнителей для различных композиционных материалов на основе термопластических и терморезистивных полимеров значительно снижает коэффициент трения и интенсивность изнашивания многих узлов трения.

В табл. 3 представлены свойства и состав некоторых материалов на основе фторопластов.

– *поликарбонат* применяют в машино- и приборостроении, в радио- и электротехнической промышленности, для изготовления деталей точных станков, приборов, вычислительных машин и т.д. Поликарбонат стоек к атмосферным воздействиям, воды, водных растворов минеральных кислот и солей, окислителей, масел, в то же время он растворяется в ряде углеводородов (ацетон, толуол и др.), набухает в бензине.

Таблица 3

Характеристики материалов на основе фторопласта

Марка материала	Состав, %	Плотность ρ , кг/м ³	Прочность σ_B , МПа	Твердость НВ, кг/мм ²	Теплопроводность, C_p , Вт/(м·к)	Коэффициент трения, f	Интенсивность изнашивания, $J_h \cdot 10^9$
Ф-4		2,18÷2,21	14,0–35,0	30–40	0,2	0,04	80–100
Ф4К20	Ф-4, 80 Кокс, 20					0,06	0,75–1,0
Ф4М15	Ф-4, 85 MoS ₂ , 15	2,25	13,5	50	—	0,07	0,5–1,8
Ф4С15	Ф-4, 85 Стекло-волокно рубл. 15	2,20	11–14	50–60	—	0,08–0,09	1,7–2,0
Ф4К15М5	Ф-4, 80 Кокс, 15 MoS ₂ , 5	2,19	14	40	—	0,08–0,09	1,7–2,0
АМИП-15М ФН-202	Ф-4, Ситал, MoS ₂ Ф-4, никель, Нитрид бора, MoS ₂	2,25	10–14	46–80	0,35	0,1–0,12	1,8–2,1
		2,40	11–18	40–70	0,30	0,12–0,15	28–32
КРИОЛОН-3	Ф-4, 82 Углеродное волокно, 5 MoS ₂ , 3	2,21	22–25	55–60	0,36	0,08–0,1	0,5–0,7

Поликарбонат пригоден для работы в условиях низких и сверхнизких температур, в среде газообразного и жидкого азота, водорода и гелия при температуре до -253°C . Он обладает высокой ударной прочностью и стабильностью размеров деталей, малой ползучестью, однако плохо сопротивляется циклическим воздействиям нагрузки и имеет низкую усталостную прочность.

Для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости в поликарбонат вводят специальные наполнители и твердые смазки. Промышленность выпускает поликарбонат – *дифлон*, наполненный 25% по массе стекловолокном (дифлон СТН) и наполненный фторопластом (*дифлон* ДАК 8). Введение дисульфида молибдена, графита или 15-20% фторопласта - 4 снижает коэффициент трения в 2-3 раза.

К недостаткам поликарбоната следует отнести склонность к образованию микротрещин в поверхностном слое под влиянием остаточных напряжений после механической обработки и вследствие инородных включений и микропор. Поликарбонат перерабатывают литьем под давлением и экструзией.

Материалы на основе поликарбоната применяют в несмазываемых узлах трения для деталей уплотнений, клапанов и других элементов, работающих в вакууме, в инертной газовой и других средах при температурах $-50-110^{\circ}\text{C}$.

В табл. 4 приведены состав и свойства некоторых материалов на основе поликарбоната.

– *полиолефины*. Расширяется применение *полиолефинов* (*полиэтилен высокого давления, полипропилен*) в качестве антифрикционных материалов как в чистом виде, так и в композициях с наполнителями.

Термопластичный полиэтилен используется в качестве полимерной основы композиционных самосмазывающихся материалов благодаря своей низкой адгезионной способности, достаточно высокой механической прочности, химической инертности и хорошей технологичности. Наибольшее применение получил полиэтилен низкого давления (ПЭНД), имеющий более упорядоченную структуру макромолекул, более высокую степень кристалличности (75-85%), плотность, механическую прочность, модуль упругости при изгибе и теплостойкость.

Для улучшения триботехнических характеристик в ПЭНД вводят фторопласт-4, гексафторэтилен, дисульфид молибдена, графит, пентапласт, поликарпоамид, металлы.

В табл. 5 приведены основные физико-механические и триботехнические характеристики ПЭНД.

Таблица 4

Материалы на основе поликарбонатов

Марка материала	Основные компоненты	Плотность, г/см ³	Прочность, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²	Твердость НВ, кг/мм ²	Предельная рабочая температура, °С	Метод переработки
ДАК-8	Поликарбонат, фторопласт-4	1,23	50÷55	105	87	115	Литье под давлением
Эстеран-29	Поликарбонат, MoS ₂	1,30	—	6	200	110	Прессование
Эстеран-35	Поликарбонат, MoS ₂	1,41	52	30÷70	140	110	Литье под давлением
Эстеран-51	Поликарбонат, MoS ₂	1,25	60	100÷200	100	110	Литье под давлением
ДАК-12-3BN	Поликарбонат, BN	1,20	55	—	90	110	Литье под давлением
ДАК-УП5Д	Поликарбонат, графит	1,25	90	—	—	—	Литье под давлением

Таблица 5

Характеристики ПЭНД

Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Относительное удлинение, %	Модуль упругости при растяжении, Мпа	Ударная вязкость, кДж/м ³	Твердость НВ, кг/мм ²	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Интенсивность изнашивания, ·10 ⁻⁹	Коэффициент трения
0,95	24÷42	50÷12000	650÷750	2÷120	49÷60	0,42÷0,44	1,75	0,1÷0,15

Экспериментальные исследования композиционных материалов на основе полиэтилена показывают, что повышение износостойкости в ряде случаев приводит к снижению прочности и модуля Юнга.

На основе полиолефинов создают *композиционные материалы*, вводя различные наполнители (сажу, каучук, стекловолокно, древесные опилки и т.д.), что позволяет получать материалы, обладающие высокой износостойкостью и коэффициентом трения 0,1–0,15.

К *недостаткам* свойств полиолефинов следует отнести низкую теплоемкость, так как детали узлов трения могут длительно эксплуатироваться при температуре не выше 60°C (кратковременно до 80°C). Это снижает возможность применения полиолефинов в машиностроении.

– *полиарилаты* – термопластичные полимеры, перерабатываются литьем под давлением или литьевым прессованием. Детали узлов трения из полиарилата могут работать длительно при температуре 160–180°C, кратковременно – при температуре 230°C. Наряду с высокой теплостойкостью полиарилат обладает высокой сопротивляемостью ионизирующим излучениям, хорошими диэлектрическими свойствами, достаточной химической стойкостью, морозостойкостью (могут работать при температуре до –100°C).

Для улучшения антифрикционных свойств полиарилаты *наполняют* твердыми смазочными материалами. Упомянутые свойства полиарилатов показывают, что это весьма перспективный материал для деталей узлов трения, особенно для несмазываемых.

Широкое применение в машино- и приборостроении находят антифрикционные самосмазывающиеся материалы на основе полиарилатов для изготовления деталей подшипников скольжения и качения, предназначенных для работы в глубоком вакууме без смазки.

Полиарилаты марок Ф-1, Ф-2, Д-3, Д-4 и др. в чистом виде имеют высокий коэффициент трения (0,35–0,40) и относительно невысокую износостойкость. С целью улучшения триботехнических характеристик и повышения теплостойкости в полиарилат добавляют фосфор, дисульфид молибдена, медь и серебро. Например, композиционный материал Делан-524 на основе полиарилата ДВ-101 с добавкой 15% масс дисульфида молибдена обладает самой высокой теплостойкостью среди полимерных материалов, перерабатываемых литьем под давлением.

Чистый полиарилат марки ДВ имеет нестабильные триботехнические характеристики из-за высокой величины адгезионной составляющей.

щей силы трения в результате наличия гидроксильных групп и макромолекул.

Терморезактивные полимеры

Терморезактивные полимеры обрабатываются преимущественно методами компрессионного и литьевого прессования, они более прочны и термостойки. Порошкообразные терморезактивные композиции наносят на трущиеся поверхности деталей в виде тонких покрытий.

В качестве антифрикционных терморезактивных материалов наиболее широко используют:

– полиимиды – это термостойкие *терморезактивные полимеры*, применяющиеся в качестве связующего при изготовлении композиционных антифрикционных материалов.

На основе полиимидов выпускают композиты, наполненные дисульфидом молибдена и графитом. В последние годы разработаны материалы, наполненные углеродным волокном. Эти материалы обладают высокой радиационной и химической стойкостью, прекрасными триботехническими свойствами и могут длительно эксплуатироваться при температуре 220–260°C. Изделия из таких материалов получают в основном прессованием с последующим спеканием.

Подшипники, изготовленные из наполненного полиимидом с хаотично ориентированными графитированными волокнами имеют износостойкость в 7 раз большую, чем в случае ориентации графитовых волокон вдоль направления скольжения. Для работы в области криогенных температур применяют полиимиды, наполненные бронзой.

Недостатком материалов на основе полиимидов является большая скорость газовой выделения, что в некоторых случаях ограничивает их использование в вакуумной технике, а также хрупкость, предъявляющая особые требования к технологии обработки деталей. Кроме того, эти материалы имеют высокую стоимость. Поэтому их применяют лишь для изготовления ответственных деталей подвижных сопряжений, работающих в экстремальных условиях.

Некоторые свойства полиимидов представлены в табл. 6

– полиформальдегидные смолы – терморезактивные полимерные материалы, применяемые для изготовления деталей узлов трения в машиностроении (шестерни, втулки, муфты сцепления, подшипники, сепараторы и др.). Эти материалы обладают высокой стойкостью по отношению к органическим растворителям, действию горячей воды, растворов солей, морской воды, щелочей, растворов органических кислот.

Таблица 6.

Характеристики материалов на основе полиимида

Марка материала	Состав	Плотность, ρ , кг/м ³	Прочность σ_v , МПа	Удельная вязкость КС, кДж/м ³	Твердость НВ, кг/мм ²	Предельная рабо- чая температура, °С
ПА 6-1-203	ПА, графит	1,15	60÷72	18÷50	130	-60 ÷ 165
ЛАМ-1	ПА, графит, алюминиевая пудра	1,18	53	20	200	-60 ÷ 165
ПА12-11-13	ПА, MoS ₂	1,03	49	3-7	85	-60 ÷ 165
ПА66ПЭ	ПА, полиэтилен	1,13	70	4	110	- 40 ÷ 80
ПА610-1-103	ПА, графит	1,12	55	50÷80	—	до 120
ПА610-1	ПА, стекловолокно, MoS ₂	1,35	125	20÷50	—	до 120
САМ-3	ПА, добавки	1,30	55	40÷50	130	до 100
САМ-5	ПА, графит, добавки	1,16	47	35÷51	95	до 100
ПНС610-Т10	ПА, тальк	1,16	50÷60	50÷80	—	до 120
МАСЛЯНИТ КСПЭ	ПА, стекловолокно, поли- этилен, медь	—	—	30	80	-50 ÷ 200

Изделиям из полиформальдегидов свойственна высокая жесткость, стабильность размеров, высокая износостойкость, стойкость к старению; их можно эксплуатировать при температуре до 120°C. Коэффициент трения чистого полиформальдегида по стали без смазки – 0,30–0,35.

Фенолформальдегидные полимеры (ФФП) широко применяют при создании антифрикционных полимерных материалов вследствие их повышенной термической и химической стойкости и износостойкости. Для повышения износостойкости и улучшения антифрикционных свойств полиформальдегид *наполняют* стекловолокном, фторопластом, дисульфидом молибдена, углеродным волокном, коксом, сажей, графитом. Введение в сополимер полиформальдегида 15–20% фторопласта снижает коэффициент трения в 1,5–2 раза, интенсивность изнашивания – в 3–4 раза.

Известны самосмазывающиеся материалы на основе ФФП следующих марок: АТМ-1, АТМ-1Т, Вилан-9Б, Синтек-2, АМАН-24. Материал марки АТМ-1 обладает высокой износостойкостью и теплопроводностью, но он хрупок, и поэтому его применяют в узлах трения, не работающих при ударных нагрузках. Для устранения этого недостатка используют волокнистые наполнители (углеродные и органические волокна) или ткани, например, в материалах марки Синтек.

Композиционные материалы на основе эпоксидных смол нашли применение для деталей трибосопряжений вследствие хорошей адгезии эпоксидных полимеров к металлам и другим материалам, высокой механической прочности, малой усадки и водопоглощения.

Наряду с традиционными наполнителями (графит, кокс, дисульфид молибдена, оксиды металлов, различные волокнистые материалы и т.п.) в эпоксидные смолы вводят олигомеры, полиэтилен, кремнийорганические смолы, двуокись титана и другие специальные добавки, что значительно увеличивает твердость, жесткость, нагрузочную способность и износостойкость композиционных материалов. Свойства некоторых антифрикционных материалов на основе эпоксидных смол приведены в табл. 7.

Наиболее широкое применение получили композиционные материалы марок АМС-1, АМС-3, АМС-5М, отличающиеся высокой механической прочностью, износостойкостью, термостойкостью и низким коэффициентом трения. Из этих материалов изготавливают поршневые кольца компрессоров, работающих без смазки, торцевые уплотнения, подшипники скольжения для узлов сухого трения с нормальной влажностью при повышенных температурах, лопатки воздушных ротационных насосов.

Таблица 7

Материалы на эпоксидной основе

Марка материала	Основные компоненты	Плотность, кг/м ³	Предел прочности МПа	Номинальное контактное давление, МПа	Скорость скольжения, м/с	Интенсивность изнашивания, 10 ⁻⁸	Коэффициент трения
АМС-1	Эпоксикремний - органич. смола, кокс, нитрид бора	1,77	—	5,0	0,5	0,1	0,08
АМС-3	Эпоксикремний – органич. смола, электродный графит, кристаллический графит	1,79	—	5,0	0,5	0,22	0.10
АМС-5М	Эпоксикремний - органич. смола, углеродная ткань	1,23	—	2,0	0,5	0,05	0,11
ЭДМА - 10	Эпоксидная смола, наполнитель	1.90	8,0	2,0	0.06	2.0	0,23
Э10Н5	Эпоксидная смола, графит, никель	1,35	9.5	0,65	1,0	1,2	0,35

Антифрикционные полимерные материалы на основе реактопластов являются одним из самых перспективных конструкционных материалов.

Самосмазывающиеся полимерные композиционные материалы.

В машиностроении разработан целый ряд конструкций подшипников, передач, направляющих и уплотнений, в которых смазывание обеспечивается благодаря специальным элементам конструкции (деталям), изготовленным из так называемых полимерных самосмазывающихся материалов.

По составу все полимерные самосмазывающиеся материалы можно разделить на следующие группы:

- композиции, содержащие главным образом антифрикционные наполнители, полимерные связующие и пластификаторы (дополнительные смазочные материалы);

- композиции с комплексными наполнителями, улучшающими физико-механические и триботехнические свойства материалов;

- комбинированные самосмазывающиеся материалы типа металло-полимерной ленты, в которой совмещаются преимущества составных частей металла, как несущей и теплопроводной основы и полимера, как антифрикционного самосмазывающегося слоя, обеспечивающего надежную защиту поверхности трения от схватывания.

В самосмазывающиеся материалы включают обычно в качестве основного компонента графит и дисульфиды, диселениды, дителлуриды металлов и другие соединения.

Все перечисленные твердые смазки имеют слоистое строение. Поэтому 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 (см. табл. 8).

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 ме-

Таблица 8

Характеристики материалов на основе полиимида

Марка материала	Состав материала	Плотность ρ , г/см ³	Прочность, σ_b , МПа	Ударная вязкость КС, кДж/м ²	Твердость НВ, кг/мм ²	Предельная рабочая температура, °С
Полиар-2	ПМ-67, MoS ₂	1,3	—	50	140	-196 ÷ 300
Тесан-38	ПМ-69, MoS ₂	1,3	—	30	140	-196 ÷ 250
ПМ-67-ДИ-3	ПМ-67, MoS ₂	1,43	90÷130	20÷70	210÷310	-196 ÷ 250
ПМ-69-ДМ-3	ПМ-67, MoS ₂	1,45	85÷120	30÷50	210÷280	до 250
ПМ-67-Г10	ПМ-67, графит	1,45	70÷98	8÷30	230÷330	до 250
ПМ-69-Г5	ПМ-69, графит	1,47	70÷90	20÷40	220÷330	до 250
ПАМ 15-67	ПМ-67, графит	1,42	80÷100	16÷30	300	-196 ÷ 250
ПАМ 15-69	ПМ-69, графит	1,42	65÷80	7,8	330	-196 ÷ 250
ПАМ 50-67	ПМ-7, графит, нитрид бора	1,62	44÷45	1,5÷5,0	270÷300	-196 ÷ 250
ПАМ 50-69	ПМ-69, графит, нитрид бора	1,5÷1,6	30÷38	5,0	300	-196 ÷ 250

ханические, тепловые, антифрикционные характеристики и применяются широко в машиностроении в качестве подшипников и т.д.

В табл. 8 приведены составы и основные свойства самосмазывающихся композиционных материалов на основе полиимидов. Коэффициент трения этих материалов с увеличением скорости скольжения снижается. Детали узлов трения получают горячим прессованием. Для изготовления пористых изделий, например подшипников, к полиимиду добавляют полиформальдегид.

Металлокерамические антифрикционные материалы

Одним из направлений получения антифрикционных материалов является создание порошковых антифрикционных композитов. Изделия (втулки, вкладыши подшипников) получают методом порошковой металлургии. Сначала составляется смесь из порошков необходимых веществ, которая после тщательного перемешивания прессуется в виде изделия и спекается. Если это необходимо, то осуществляется механическая отделочная обработка изделия и насыщение пор смазкой. Наиболее распространены материалы на основе меди и железа.

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), Железографит наиболее распространен и выдерживает давление до 15 МПа при температуре 80–100°C.

– бронзы и графита (бронзографит),

– алюминия и графита (алюминографит),

– серебра и меди с графитом и др.

Вместо графита могут использоваться и другие твердые (слоистые) смазки: молибденит, диселениды металлов, нитрид бора.

Сплавы на основе железа, меди и других металлов *пропитывают* различными полимерами, в основном фторопластом. Используются такие материалы при тех же условиях, что и железографит при температурах до 150°C в виде двухслойных (свинцовая бронза) или трехслойных лент. 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.

Материалы на основе меди получили широкое применение из-за хороших антифрикционных свойств и высокой электропроводности, например, в скользящих электроконтактах в щётко-коллекторных узлах электродвигателей и генераторов и т.д. Типичным представителем этой группы являются *медно-графитовые компоненты* с содержанием графита до 75 %.

В качестве подшипникового материала также используются пористые *оловянные бронзы*. Они применяются в подшипниках, работающих в легком режиме при небольших скоростях скольжения (менее 1,5 м/с) и номинальных давлениях (0,5 – 1 МПа). Благодаря смазке, содержащейся в порах, они могут работать без наполнения маслом до 5000 ч при температуре от –60°С до 120°С с коэффициентом трения 0,01–0,04. Эти подшипники используются в маломощных электромоторах и генераторах, пусковых установках ДВС. В табл. 9 приведены сведения о некоторых оловянистых бронзах.

Таблица 9.

Свойства оловянистых бронз

Марка	Массовая доля Sn, %	Плотность, кг/м ³	Пористость, %	Предел прочности σ_b , МПа	Твердость НВ, МПа
Бр010	10	6–7	20–30	20–35	60–75
Ст100 США)	9,5–10,5	6,4–7,2	–	40–50	100–120
SM500 (ФРГ)	10	5,6–11	–	–	–

В подшипниках мотоциклов, тракторов, насосов и др. используются бронзографитные материалы. Они выдерживают большие нагрузки и скорости скольжения, чем бронзы.

В двигателях грузовых автомобилей, судовых и железнодорожных дизелях в России и ведущих странах зарубежья используются свинцовистые бронзы.

В последнее время в России и за рубежом используются металлофторопластовые материалы. Они обладают широким диапазоном эксплуатационных свойств, способны работать без смазки в агрессивных средах, в вакууме, при температуре от –200°С до 300°С. Подшипниковые вкладыши состоят из стальной основы, тонкого припеченного слоя высокооловянистой бронзы (до 0,3 мм), поры которого заполнены смесью фторопласта с дисульфидом молибдена.

Помимо сплавов на медной основе все больше распространяются антифрикционные алюминиевые сплавы. Технология изготовления

вкладышей такая же, как при применении медных сплавов. Поры пропитываются маслом. Используются твердосмазочные добавки.

Наиболее распространены в общем машиностроении (сельхозмашины, дорожно-строительные механизмы и т.д.) материалы на основе *железа*. В шихту, также как и у медных сплавов, вводится графит, сернистый цинк, дисульфид молибдена, нитрид бора. Поры спрессованного материала заполняются маслом. Чаще всего применяются железографитовые втулки. С ростом содержания графита улучшаются антифрикционные свойства, однако падает прочность. Содержание графита обычно не превышает 10 % от общей массы. В качестве легирующих элементов к железу добавляют медь, серу, фосфор. Медь повышает прочность и улучшает спекаемость. Её содержание колеблется от 0,5 до 20 %.

Применение железографитовых подшипников позволяет экономить большое количество сплавов цветных металлов, бронзы, баббита. В ряде случаев железографитовые подшипники скольжения могут успешно заменить шариковые и роликовые подшипники качения. Наличие графита и запас жидкой смазки в порах придают металлокерамическим подшипникам свойства самосмазывающихся, что уменьшает опасность выхода из строя узлов трения из-за недостаточной смазки.

В настоящее время решена задача изготовления металлокерамических поршневых колец для двигателей внутреннего сгорания. Такие поршневые кольца имеют более высокую износостойкость по сравнению с обычными чугунными. Они работают до выхода из строя на 30-45 тыс. км пробега автомашин больше, чем чугунные, и на 30 % меньше изнашивают цилиндры двигателя.

Расширяется также применение пористых спеченных подшипников, пропитанных фторопластом. Такие подшипники весьма перспективны для несмазываемых опор скольжения благодаря высоким антифрикционным свойствам фторопласта. Коэффициент трения подшипников, пропитанных фторопластом, без смазки составляет примерно 0,05. Они надежно работают при температурах до 280 °С в кислых и щелочных средах.

Разработаны антифрикционные спеченные материалы для подшипников газовых и паровых турбин, работающих при высоких температурах. Для получения этих деталей используют порошки хромоникелевых сталей типа Х18Н15, ХЗН18 с добавками в шихту дисульфида молибдена. Спеченные материалы имеют плотность, превышающую 90 %. Более низкая стоимость пористых спеченных подшипни-

ковых материалов по сравнению с бронзой и баббитом стимулирует дальнейшее развитие этого направления разработки триботехнических материалов и технологий.

Антифрикционные покрытия

В современной технике получили широкое применение *антифрикционные покрытия*, наносимые на поверхность деталей трибосопряжения.

Покрытия могут быть полимерными, металлическими, из твердых смазок, из оксидов или других соединений. Они обычно не нуждаются в смазке.

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.

Фрикционные материалы.

Фрикционные материалы – конструкционные материалы трения, предназначенные или используемые для работы в узлах передающих или рассеивающих кинетическую энергию (тормоза, фрикционные муфты, сцепления, демпферы и др.).

Эффективность работы таких материалов в значительной степени определяется значениями коэффициента трения и износостойкости, величина которых определяется в каждом случае конкретными условиями работы и могут изменяться для f от 0,07 до 1 и I_h от 10^{-3} до 10^{-13} .

В отличие от антифрикционных, фрикционные материалы *должны обладать* высоким и стабильным коэффициентом трения, достаточной износостойкостью, прочностью, устойчивостью к температурным колебаниям, воздействию абразива и агрессивных сред.

В частности, материалы тормозов и фрикционных муфт должны обеспечивать плавное срабатывание системы без автофрикционных колебаний, проявляющихся в форме скрипа при торможении, или пробуксовки и обеспечивать высокие показатели долговечности.

При торможении вся кинетическая энергия транспортного средства в тормозах преобразуется в тепло, и поэтому в момент торможения температура трущихся поверхностей, например в тормозе самолетов, достигает 1200°C , а в объеме тормозной накладки до 600°C . В тормозах авто-

мобилей эти температуры соответственно могут достигать 400°С и 200°С.

В связи с этим выбор фрикционных материалов должен производиться с учетом *тепловых условий работы* узла трения. Во всем диапазоне рабочих температур материал не должен претерпевать фазовых превращений, вызывающих изменение его объема, т.к. это может привести к ускорению усталостного разрушения всей конструкции под влиянием остаточных напряжений.

Важными характеристиками фрикционных материалов являются фрикционная теплостойкость и фрикционная термоусталость.

Фрикционная теплостойкость – характеристика, определяющая изменение фрикционных свойств материала в зависимости от температуры, обычно выражаемая через изменение коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

Фрикционная термоусталость – усталость материала, при которой накопление необратимых изменений, приводящих к возникновению на поверхности трения трещин, происходит под воздействием многократного (циклического) совместного теплового и силового нагружений. При этом деформирование от тепловых нагрузок в ряде фрикционных узлов (муфты, тормоза) больше, чем от механических. Под влиянием обоих видов нагрузок происходит в дальнейшем развитие трещин.

Виды фрикционных материалов

На практике существуют следующие *виды* фрикционных материалов:

- металлические,
- асбокаучуковые,
- асбосмоляные,
- органические,
- металлокерамические.

Металлические фрикционные материалы

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.

Сталь редко используется в качестве фрикционного элемента в нагруженных узлах трения вследствие усадки и коробления деталей в процессе работы. Исключение составляет *графитизированная сталь*, структура и механические свойства которой сохраняются неизменными при многократных и быстрых теплосменах. Обычно в этих условиях применяют *легированные чугуны* с мелкими равномернораспределенными включениями графита. Такие чугуны работают в паре либо со спеченным материалом, либо с пластмассой. Перспективными являются пары трения с обоими спеченными элементами, при создании материала которых компоненты и матрица материала подбираются так, чтобы свести к минимуму деформацию под влиянием фазовых превращений.

Для изготовления ряда элементов наиболее нагруженных фрикционных устройств – тормозов и муфт сцепления – применяются материалы, получаемые методом порошковой металлургии спеченные фрикционные материалы. Наибольшее распространение получили материалы на основе железа и меди.

Металлокерамические материалы получают методом порошковой металлургии: прессованием с последующим спеканием или наплавкой порошковой проволоки, взрывом. Такие материалы весьма теплостойки, т. е. основа их может быть медная и железная.

Однако они склонны к схватыванию и имеют резко выраженную падающую характеристику $f-T$.

Перспективным является применение пористых металлокерамических материалов, пропитанных различными полимерами.

Асбестовые материалы

Как правило, в состав материалов входят три компонента: теплостойкий армирующий материал с прочными волокнами, например асбест (15–16%); теплостойкие с высоким и стабильным коэффициентом трения порошкообразные наполнители неорганического происхождения (20–60%); полимерное связующее – натуральные и синтетические каучуки, синтетические смолы (15–30%) с вулканизационными агентами или отвердителями, ускорителями и активаторами вулканизации или отверждения.

Наполнителями асбестовых материалов служат железный сурик, баритовый концентрат, окислы хрома и других металлов. Добавляются также порошкообразный кокс, графит, технический углерод. Для

повышения теплопроводности вводятся порошки и стружка из меди, латуни, цинка, алюминия, железа и т.д.

Связующими являются натуральные и искусственные каучуки и смолы, а также их комбинации. Используются бутадиеновые, бутадиенстирильные, бутадиенметилвинилпиримидиновые, стирольные и другие синтетические каучуки. В качестве смол применяются фенолформальдегидные, анилинфенолформальдегидные, кремнеорганические, эпоксидные компаунды и др. Одновременно вводятся вулканизаторы и отвердители.

Фрикционно-полимерные материалы на каучуковых связующих обладают достаточно высокими фрикционно-износостойкими свойствами до 200...250 оС. При более высоких температурах их износостойкость недостаточна, что является причиной низкого коэффициента трения.

Изделия на смоляной основе имеют большую теплостойкость, но обладают нестабильным коэффициентом трения, хрупкостью. Поэтому наилучший результат достигается при совместном использовании смол и каучуков. Неудачное сочетание связующих из-за нестабильности коэффициента трения приводит к возникновению автофрикционных колебаний (скрип и визг тормозов).

По способу изготовления фрикционные материалы на полимерной основе делятся на четыре группы: формованные (колодки, накладки, секторы, пластины, вкладыши); вальцованные (ленты и накладки); тканые (ленты, накладки); картонно-латексные (накладки).

Органические фрикционные материалы

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.

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.

Смазочные материалы предназначены для надежного разделения поверхностей трущихся деталей в условиях граничной, гидродинамической и эластогидродинамической смазки. Одновременно они должны снижать силу трения, интенсивность изнашивания, а также демпфировать удары и вибрации.

Смазочные материалы и системы смазки должны удовлетворять следующим требованиям:

- гарантировано смазывать узел трения в заданных техническими условиями эксплуатации интервалах температуры, давления и скорости скольжения;
- поддерживать установленные значения функциональных показателей узла трения в пределах определенного срока эксплуатации и хранения;
- не оказывать вредного воздействия на контактирующие с ними материалы;
- быть экологически и пожаро-, взрыво-безопасными.

От правильного подбора смазочного материала и его качества во многом зависит долговечность машины.

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 Р2, Си;
- содержание растворителей (фенола, крезола, нитробензола и фуртуурола, 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.

В настоящее время в зависимости от физического состояния смазочного материала различают газообразные, жидкие, пластичные, твердые смазки.

Присадки к смазочным материалам

Присадкой называют вещество, добавляемое к смазочному материалу для придания ему новых свойств или изменения существующих. Применяют в основном три вида присадок: антифрикционные, противоизносные и противозадирные.

По *агрегатному состоянию смазки* делятся на жидкие, пластичные (консистентные) и твердые. *Жидкие смазки* – масла считают вязкими (ньютоновскими) жидкостями, предназначены они для использования в циркуляционных системах смазки. *Пластичные смазки* применяются для смазывания подшипников качения и шарниров в отсутствие циркуляции. Они закладываются при сборке в полости узлов трения. *Твердые смазки* используются в узлах, работающих обычно в экстремальных условиях: при высоких температурах, контактных давлениях, в глубоком вакууме, при заметном уровне радиации и др.

Жидкие 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; Эти смазочные материалы состоят из основы базового масла, а также присадок, улучшающих природные свойства базового масла или придающих ему необходимые новые свойства. Эксплуатационные свойства моторного масла определяются в основном составом и вязкостью базового масла, а также типом и концентрацией добавленных к нему присадок;

– *трансмиссионные*, применяемые для смазки элементов трансмиссий, транспортных средств; Автотракторные трансмиссионные масла предназначены для смазывания механических и гидромеханических передач подвижных наземных машин. Типичный вид повреждения рабочих поверхностей зубьев шестерен и подшипников

трансмиссий – усталостное выкрашивание, при наличии высоких контактных температур, и заедание. Эффективные меры борьбы против заедания – добавление противозадирных присадок к маслам.

– *индустриальные*, применяемые для смазки промышленного оборудования, а также в качестве рабочих жидкостей гидросистем. Назначение масел для промышленного оборудования (индустриальных масел) – способствовать снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания в трущихся узлах станков, прессов, прокатных станов и другого промышленного оборудования. Одновременно индустриальные масла должны отводить тепло от узлов трения, защищать детали от коррозии, очищать трущиеся поверхности от загрязнения, не допускать образования пены при контакте с воздухом и т.д.

Индустриальные масла по вязкости условно делят на три подгруппы:

- маловязкие (легкие) вязкостью от 6 сСт при 20°C до 10 сСт при 50°C;
- средневязкие (средние) вязкостью от 10 до 58 сСт при 50°C;
- вязкие (тяжелые) вязкостью от 58 сСт при 50°C до 95 сСт при 100°C.

Пластичные (консистентные) смазочные материалы

Эти смазочные материалы представляют собой полутвердый или твердый продукт, состоящий из смеси минерального и синтетического масла, загустителя (твердые углеводороды, различные соли жирных кислот и др.), присадок и наполнителей (графит, дисульфид молибдена и др.).

Основные достоинства пластичных смазочных материалов:

- способность удерживаться в негерметичных узлах трения;
- работоспособность в широких температурных и скоростных диапазонах;
- хорошая смазывающая способность;
- работоспособность в контакте с водой и другими агрессивными средами;
- большая экономичность применения.

Недостатки пластичных смазочных материалов:

- плохая охлаждающая способность;
- склонность к окислению;
- сложность подачи к узлу трения.

Твердые смазочные материалы

Твердые смазочные материалы – это материалы, которые обеспечивают смазку между двумя поверхностями в условиях сухого или граничного трения в экстремальных условиях. Они могут или входить в качестве наполнителя материала или покрытия в состав одного или двух элементов пары трения или вноситься в виде порошка.

Основные типы твердых смазочных материалов: графит, дисульфид молибдена (MoS_2), дисульфид вольфрама (WS_2) и некоторые другие (MoSe_2 , WSe_2 , NbSe_2 , PbI_2 , BN , MoT_2). Графит при трении по твердой поверхности служит хорошим смазочным материалом для деталей, работающих на воздухе.