

**О. В. Фёдорова  
В. А. Марков**

**ОСНОВЫ ТРИБОЛОГИИ  
И ТРИБОТЕХНИКИ В ОБОРУДОВАНИИ  
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ЛЕСНОЙ  
И ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
2024**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна»  
Высшая школа технологии и энергетики**

**О. В. Фёдорова  
В. А. Марков**

**ОСНОВЫ ТРИБОЛОГИИ  
И ТРИБОТЕХНИКИ В ОБОРУДОВАНИИ  
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ЛЕСНОЙ  
И ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Учебное пособие**

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург  
2024

УДК 620.178.162 (075)

ББК 34.41я7

Ф 333

*Рецензенты:*

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизации, метрологии и управления в технических системах» СПбГЛТУ

*Б. М. Шифрин;*

кандидат технических наук, заместитель директора института технологии Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

*И. В. Ключкин*

**Фёдорова, О. В.**

Ф 333 Основы трибологии и триботехники в оборудовании целлюлозно-бумажного производства. Контактное взаимодействие твердых тел в технологических комплексах лесной и целлюлозно-бумажной промышленности: учебное пособие / О. В. Фёдорова, В. А. Марков — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. — 50 с.  
ISBN 978-5-91646-407-8

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам дисциплины «Основы трибологии и триботехники в оборудовании целлюлозно-бумажного производства» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование». Изложены теоретические основы трибологии, понятие о трении, износе и смазочном действии в механизмах, а также представлены вопросы для самопроверки в виде тестов.

Пособие предназначено для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения. Отдельные разделы пособия могут быть полезны аспирантам и специалистам, работающим в области триботехники.

УДК 620.178.162 (075)

ББК 34.41я7

ISBN 978-5-91646-407-8

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024

© Фёдорова О. В., Марков В. А., 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТРИБОЛОГИИ .....	6
2. ПОНЯТИЕ О ТРЕНИИ .....	12
2.1. Классификация видов трения .....	12
2.2. Трение покоя без смазочного материала .....	13
2.3. Трение скольжения без смазочного материала.....	13
2.4. Трение качения без смазочного материала .....	14
2.5. Причины возникновения силы трения.....	18
2.6. Трение характеризуется силой трения.....	20
3. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА .....	22
3.1. Кристаллические тела.....	22
3.2. Аморфные тела .....	24
4. МИКРОГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТИ.....	25
4.1. Геометрические характеристики поверхности .....	25
4.2. Контакт поверхностей .....	27
4.3. Нагрузка, скорость и температура в контакте .....	28
5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТРУЩИХСЯ ТЕЛ .....	29
5.1. Остаточные напряжения и микротвердость.....	29
5.2. Поверхностная энергия .....	29
5.3. Адсорбция и хемосорбция .....	30
5.4. Эффект Ребиндера (эффект адсорбционного понижения прочности) .....	31
5.5. Диффузия и химическая активность .....	31
5.6. Адгезия.....	32
5.7. Структура поверхности .....	32
6. ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ .....	33
6.1. Абразивное изнашивание .....	34
6.2. Усталостное изнашивание.....	35
6.3. Изнашивание при заедании.....	36
6.4. Эрозионное изнашивание.....	37

6.5. Кавитационное изнашивание.....	37
6.6. Изнашивание при фреттинге.....	38
6.7. Окислительное изнашивание.....	38
6.8. Изнашивание при фреттинг-коррозии.....	39
6.9. Водородное изнашивание.....	39
6.10. Изнашивание при избирательном переносе.....	40
6.11. Дополнительные замечания.....	41
7. СМАЗКА И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	42
7.1. Трение со смазочным материалом.....	43
7.2. Трение при граничной смазке.....	44
7.3. Трение при гидродинамической смазке.....	44
7.4. Трение при эластогидродинамической смазке.....	45
7.5. Трение при смешанной смазке.....	45
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	46
ТЕСТЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ ПО ТРИБОЛОГИИ И ТРИБОТЕХНИКИ.....	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	50

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности и долговечности машин, решение экологических задач является одной из главных проблем современной науки и техники. Известно, что основной причиной выхода из строя машин является не их поломка, а износ подвижных сопряжений и рабочих органов под влиянием сил трения. Поэтому указанная проблема может быть решена только при удачном применении результатов теоретических и прикладных исследований в области трения, изнашивания и смазки так называемых трибологических явлений.

Большинство машин выходит из строя по причине износа деталей. Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в несколько раз превышает ее стоимость: для автомобилей в 6 раз, для самолетов до 5 раз, для станков до 8 раз.

Термин «трибология» впервые появился в печати в 1966 году в докладе группы британских экспертов парламенту о состоянии проблем смазки и происходит от греческого "tribos" – трение.

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

**Трибология** – это наука о трении, износе и смазочном действии в машинах и механизмах. Научно-техническая дисциплина, рассматривающая взаимодействие поверхностей в относительном движении и его практические приложения, или трибология – наука о трении, изнашивании и смазке.

**Триботехника** – как раздел трибологии – научно-техническая дисциплина, рассматривающая практическое применение трибологии при проектировании, изготовлении и эксплуатации узлов трения.

Из-за износа узлов и деталей, а также рабочего инструмента происходит 80...90 % отказов машин. За полный срок службы машин эксплуатационные расходы, трудоемкость ремонта и затраты материалов на ремонт в несколько раз превышают затраты на изготовление новых машин. Ремонтом оборудования в развитых странах занято около 30 % общего числа рабочих и станочного парка. На ремонт расходуется 20 % всего выплавляемого металла.

## 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТРИБОЛОГИИ

Одним из стимулов для развития науки о трении, изнашивании и смазке явилось бурное развитие автомобилестроения и других видов транспортного машиностроения в начале XX века. К настоящему времени трибология окончательно оформилась как самостоятельная отрасль знаний. Во всех развитых странах имеются научные трибологические центры и ведется подготовка инженеров-трибологов. Решение проблем трения, изнашивания и смазки позволило добиться высокого экономического эффекта. По оценкам международных экспертов широкое внедрение достижений в этой области способно на треть сократить затраты на ремонт и эксплуатацию автотранспортных средств, причем на одну шестую без заметных капитальных вложений. Считается, что основными направлениями работ по существенному повышению эксплуатационных свойств транспортных средств на основе использования трибологии являются следующие:

- совершенствование конструкции узлов трения транспортных машин, снижение материалоемкости, веса, повышение надежности и ресурса;
- применение новых материалов и технологий для повышения износостойкости и несущей способности пар трения;
- разработка и применение смазочных материалов четвертого и пятого поколений, на которые уже переходят развитые страны;
- использование экологически чистых методов эксплуатации, новых антифрикционных и фрикционных материалов с повышенными параметрами, не содержащих асбест, свинец, соединения тяжелых металлов и другие токсичные и канцерогенные вещества;
- совершенствование конструкции уплотнений, обеспечивающих низкое трение, герметичность и исключающих попадание абразива в сопряжения деталей;
- ускорение перевода транспортных энергетических установок на более эффективные и экологически чистые энергоносители: топливный газ, электроэнергию, водород, солнечную энергию, применение энергоемких аккумуляторов энергии как электрохимических, так и механических. Применение эффективных каталитических устройств газоочистки;
- повышение образовательного уровня инженеров-конструкторов, технологов и эксплуатационников в области трения, износа, смазки и других проблем трибологии.

Уже начальный период развития инженерной мысли был ознаменован такими гениальными открытиями в трибологии, как получение огня трением (эпоха палеолита), замена трения скольжения трением качения (изобретение колеса в IV тысячелетии до н. э.), создание конструкций подшипников скольжения в древних колесницах, которые несомненно смазывались (в гробнице Юки и Туйи была найдена колесница, на оси которой даже сохранился смазочный материал, нанесенный до 1400 г. до н. э.).

В начале I тысячелетия до н. э. появились блоки, ставшие важным

элементом подъемных механизмов, а около 700 лет до н. э. изобретен полиспаст, который является ничем иным, как вариантом канатной передачи, т. е. типичным фрикционным механизмом. Марк Витрувий Поллион описал деревянный роликовый подшипник, а также мельницы с различными узлами трения (подшипниками, зубчатыми передачами), существовавшими в I веке до н. э.

Длительное время прогресс в трибологии был весьма незначителен, но общий подъем в эпоху Ренессанса сказался и на ее развитии.

В конце XV века проблемами трения заинтересовался гениальный художник, ученый и инженер Леонардо да Винчи (1452-1519 гг.). Он провел исключительно корректно поставленные эксперименты по исследованию трения, результаты которых сохранились в недавно обнаруженном Мадридском кодексе.

Леонардо да Винчи установил, что сила трения зависит от материала соприкасающихся поверхностей, от степени их обработки и не зависит от площади соприкасающихся поверхностей, она прямо пропорциональна нагрузке, прижимающей одно трущееся тело к другому и может быть уменьшена путем введения промежуточных тел качения (шариков или роликов) или смазочных материалов между трущимися поверхностями. Сила, необходимая для того, чтобы сдвинуть тело, лежащее на горизонтальной плоскости, согласно результатам исследований Леонардо да Винчи, составляет порядка  $\frac{1}{4}$  его веса.

Замечательный французский исследователь Гильом Амонтон (1663-1705 гг.) по результатам проведенных им экспериментов сформулировал основные законы трения (законы Амонтона) – пропорциональность силы трения нормальной нагрузке и независимость силы трения от площади контакта трущихся тел. Г. Амонтон, подтвердивший его результаты Ф. де ля Гир, и их последователи связывали возникновение трения с зацеплением неровностей поверхностей контактирующих тел и подъемом тел по этим неровностям или их деформированием при относительном перемещении твердых тел.

Несколько позже А. Паран (1666-1716 гг.) установил, что при движении тела по наклонной плоскости с углом  $\alpha$  отношение тангенциальной силы к нормальной (коэффициент трения) равно  $\operatorname{tg}\alpha$ . Это позволило рассматривать трение как результат подъема одного трущегося тела по неровностям другого, моделируемым в виде наклонных плоскостей, и связать потери на трение с углом наклона неровностей контактирующих тел.

Англичанин Дж. Т. Деагюлье (1683-1744 гг.) предположил, что трение в значительной степени определяется адгезией контактирующих тел по поверхности контакта. Однако большинство ученых того времени придерживалось представления о том, что причиной трения является подъем одного трущегося тела по неровностям другого. Таких же механических представлений придерживался Л. Эйлер (1707-1783 гг.), получивший в 1745 г. Уравнения для расчета коэффициента трения тела, равноускоренно спускающегося по наклонной плоскости. Он же развил теорию трения гибкой нити о круглый цилиндр.

Следует отметить, что еще в 1722 г. Ф. де Камю установил различие

между трением твердых тел при страгивании и установившемся скольжении. В 1758 г. Я. А. Сегнером были введены понятия трения покоя и трения движения.

Важнейшим этапом в развитии трибологии явились работы знаменитого французского инженера и физика Шарля Огюстена Кулона (1736-1806 гг.). Блестяще владея экспериментальной техникой, он всесторонне изучал трение скольжения, качения и верчения. Полученные Ш. Кулоном результаты позволяют по праву считать его основателем современной трибологии. Ш. Кулон установил, что сила трения состоит из двух составляющих, одна из которых пропорциональна внешней нагрузке, а другая – не зависит от нее, хотя эту составляющую он считал незначительной. Он также показал, что продолжительность контакта влияет на силу трения и этим объяснил различие между трением покоя и трением движения, а также выполнил первые систематические исследования трения качения.

Если XVIII век – век Ш. Кулона, Д. Деагюлье и Л. Эйлера был ознаменован существенными достижениями в изучении трения без смазочного материала, то XIX век был веком, когда были сделаны крупнейшие открытия, положившие основы теории гидродинамической смазки.

В 1847 г. Г. А. Хирн (1815-1890 гг.) на основании тщательных, хорошо продуманных экспериментов установил, что трение в подшипниках скольжения, смазанных как растительными и животными, так и нефтяными маслами, не подчиняется закону Амонтона для твердых тел, а зависит от некоторой величины, характеризующей каждое исследуемое масло и уменьшающееся с ростом температуры.

В 1883 г. была опубликована статья Н. П. Петрова (1836-1920 гг.) «Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости», в которой были изложены основы гидродинамической теории смазки. Н. П. Петровым было установлено, что сопротивление относительному перемещению при вращении одного цилиндра в другом, концентричном первом, разделенных тонким слоем смазочной жидкости, определяется внутренним трением этой жидкости. Он вывел простую формулу для расчета силы трения на поверхности шипа, связывающую эту величину с вязкостью масла. Впервые в истории науки о трении удалось связать силу трения с фундаментальной характеристикой материала (в данном случае – с вязкостью масла). Формула Н. П. Петрова до настоящего времени используется для оценки силы трения в подшипниках скольжения.

Работы Г. А. Хирна и особенно Н. П. Петрова позволили отказаться от применения в узлах трения растительных масел и перейти к более дешевым и эффективным маслам нефтяного происхождения, осуществляя их подбор по критерию вязкости.

Следует отметить, что в 1880-1881 гг. Д. И. Менделеев разработал научные основы производства смазочных масел из мазута тяжелых кавказских нефтей.

Всего через полгода после публикации упомянутой работы Н. П. Петрова английский исследователь Б. Тауэр (1845-1904 гг.) установил, что в слое

жидкости при вращении вала, разделяющем цапфу вала и подшипник, развивается давление, превышающее давление от внешней нагрузки. Исследования Б. Тауэра легли в основу теории, разработанной английским механиком О. Рейнольдсом (1842-1912 гг.), который в 1886 г. зачитал Королевскому обществу доклад «Гидродинамическая теория смазки и ее приложение к экспериментам Б. Тауэра», опубликованный в этом же году. В этой знаменитой работе О. Рейнольдс на базе основных уравнений гидродинамики получил приближенное дифференциальное уравнение распределения давлений в смазочном слое, разделяющем вращающийся шип и подшипник. Это фундаментальное уравнение, известное во всем мире как уравнение Рейнольдса, до сих пор является основным уравнением гидродинамической теории смазки.

Дальнейшее развитие теории и практики гидродинамической смазки в XX веке связано с именами Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина, А. И. Зоммерфельда, Р. Штрибека, М. Герси, Л. К. Гюмбея, А. К. Дьячкова, М. В. Коровчинского, Х. Кшениньского-Фреды, С. М. Захарова и др.

Теорию смазки в условиях, когда гидродинамический эффект не может проявиться и разделение трущихся поверхностей осуществляется тончайшим слоем продуктов взаимодействия активных компонентов смазочного материала с материалами поверхностных слоев трущихся тел, в 1919-1934 гг. разработал У. Б. Харди (1864-1934 гг.). Этот вид смазки получил название граничной. В последующие годы большую роль в дальнейшем развитии теории граничной смазки сыграли работы Б. В. Дерягина, А. С. Ахматова, Ф. П. Боудена, Д. Тейбора, Г. В. Виноградова, Г. И. Фукса, Р. М. Матвеевского, Ч. Кайдаса, И. А. Буяновского и др.

Открытие П. А. Ребиндером (1898-1972 гг.) эффекта адсорбционного понижения прочности твердых тел позволило понять, что в процессе трения при граничной смазке активно участвует не только адсорбционный слой, но и тончайшие поверхностные слои трущихся тел, свойства которых изменяются под действием активных компонентов смазочного материала.

Это явление детально изучено П. А. Ребиндером, В. И. Лихтманом, Б. Д. Щукиным, Г. И. Фуксом и др.

Весьма перспективна возможность значительного улучшения фрикционно-износных характеристик некоторых пар трения при граничной смазке за счет реализации эффекта избирательного переноса, открытого Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским в 1965 г. Следует отметить еще две работы отечественных трибологов, также удостоенных дипломами за открытия: эффекта аномально низкого трения при бомбардировке ядрами гелия некоторых материалов (А. А. Силин, М. А. Тальрозе, Е. А. Духовской и др.) и явления водородного изнашивания (А. А. Поляков, Д. Н. Гаркунов).

XX век ознаменовался значительным прогрессом в изучении процессов трения и изнашивания. Тщательные экспериментальные исследования перехода контактирующих тел от покоя к относительному движению позволили А. В. Верховскому в 1926 г. и одновременно Д. С. Рэнкину установить эффект предварительного смещения. Новые экспериментальные данные привели к

возрождению представлений Д. Дезагюлье в виде так называемых адгезионных теорий, разработанных независимо У. Б. Харди, Г. А. Томлинсоном и отечественным ученым Б. В. Дерягиным. Авторы этих теорий рассматривали трение как результат молекулярного взаимодействия контактирующих поверхностей.

Г. А. Томлинсон в 1929 г. впервые рассчитал коэффициент трения твердых тел исходя из затрат энергии при разъединении пар молекул трущихся тел по площади их упругого контакта, так что число взаимодействующих пар молекул предполагалось функцией геометрии контакта, упругих констант контактирующих тел и приложенной нагрузки. Однако прямая пропорциональность площади упругого контакта и силы трения, вытекающая из его теории, экспериментально не была подтверждена.

Большое влияние на дальнейшее развитие представлений о молекулярном механизме процесса внешнего трения оказали работы Б. В. Дерягина (1902-1994 гг.), предложившего в 1934 г. свой вариант двучленного закона трения, основанного на учете молекулярной шероховатости поверхности твердых тел и на влиянии на трение молекулярного притяжения этих тел по площади их фактического контакта. Теория Б. В. Дерягина оказала большое влияние на все последующие попытки создания теории в любой современной работе по трибологии.

В дальнейшем исследователи трения пошли по пути учета как адгезионных, так и деформационных явлений во фрикционном контакте. За рубежом получила распространение адгезионно-деформационная теория трения, развиваемая кембриджской школой трибологов, возглавляемой Ф. П. Боуденом (1903-1968 гг.). Было установлено, что в условиях скольжения фактическая площадь контакта трущихся тел представляет собой ничтожную часть номинальной их площади и что на участках фактического контакта возникают высокотемпературные вспышки. Было сформулировано положение о том, что адгезионное взаимодействие трущихся тел приводит к возникновению между контактирующими телами на микроучастках контакта «мостиков сварки», которые разрушаются и вновь образуются по мере относительного перемещения этих тел, что в значительной степени обуславливает сопротивление относительному перемещению твердых тел, т. е. процесс трения. В то же время Ф. П. Боуден и его школа учитывали деформационную составляющую силы трения в виде «пропахивающей» составляющей для пластических тел и гистерезисных потерь для упругих тел.

Опубликованная в 1950 г. фундаментальная книга Ф. П. Боудена и его ближайшего сотрудника Д. Тейбора «Трение и смазка твердых тел», в которой с позиций этих представлений был изложен практически весь фактический материал, накопленный к этому времени, оказала большое влияние на дальнейшее развитие трибологии.

В нашей стране адгезионно-деформационная теория трения развита И. В. Крагельским (1908-1992 гг.) в виде молекулярно-механической теории. Согласно этой теории, трение обусловлено как преодолением сил молекулярного взаимодействия между контактирующими поверхностями, так и

формоизменением рельефа контактирующих тел в результате упругих и пластических деформаций их поверхностных слоев. И. В. Крагельский выдвинул представление о двойственной (молекулярной и механической) природе трения. Для реализации внешнего трения сдвиговые деформации должны быть сосредоточены в тончайших поверхностных слоях трущихся тел, причем эти слои должны иметь меньшую прочность на сдвиг, чем основной металл (правило положительного градиента сдвигового сопротивления). При этом в процессе трения для каждого трибосопряжения устанавливается некая оптимальная шероховатость поверхности.

На базе представлений о молекулярно-механической природе трения И. В. Крагельский предложил уравнение для расчета коэффициента трения как без смазки, так и при граничной смазке.

В этой связи очень важны исследования адгезионных явлений при трении (Б. В. Дерягин, Д. Бакли и др.), схватывания (А. П. Семенов, С. Б. Айнбиндер и др.). Отсюда вытекают высокоэффективные триботехнологии: сварка трением (С. Б. Чудинов и др.) и наплавка трением (Я. М. Кешенбаум и др.); деформационные процессы при трении (Н. М. Михин, Д. Тайбор и др.).

Одновременно с развитием адгезионно-деформационных теорий трения развиваются энергетические представления о трибологическом процессе. Система трения как самоорганизующаяся система с привлечением положений неравновесной термодинамики и синергетики лежит в основе представлений Б. И. Костецкого и Л. И. Бершадского, а также Д. Н. Гаркунова, А. А. Полякова, Г. Польцера и др.

## 2. ПОНЯТИЕ О ТРЕНИИ

**Трение** – явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательной к ним. Трение – явление, чрезвычайно распространенное в природе и имеющее большое значение. При этом оно может выполнять и полезные, и вредные функции. На трении основана работа фрикционных и ременных передач, муфт, наклонных транспортеров, прокатных станков, тормозных устройств и т. п. Трение обеспечивает сцепление тел с земной поверхностью и, следовательно, работу машин, тракторов и другой транспортной самоходной техники. При отсутствии трения мы не могли бы ходить по земле, поскольку наши ноги скользили бы и разъезжались в разные стороны, как у неумелого конькобежца на гладком льду.

### 2.1. Классификация видов трения

Согласно ГОСТ 27674-88, различают следующие виды трения (рис. 1).

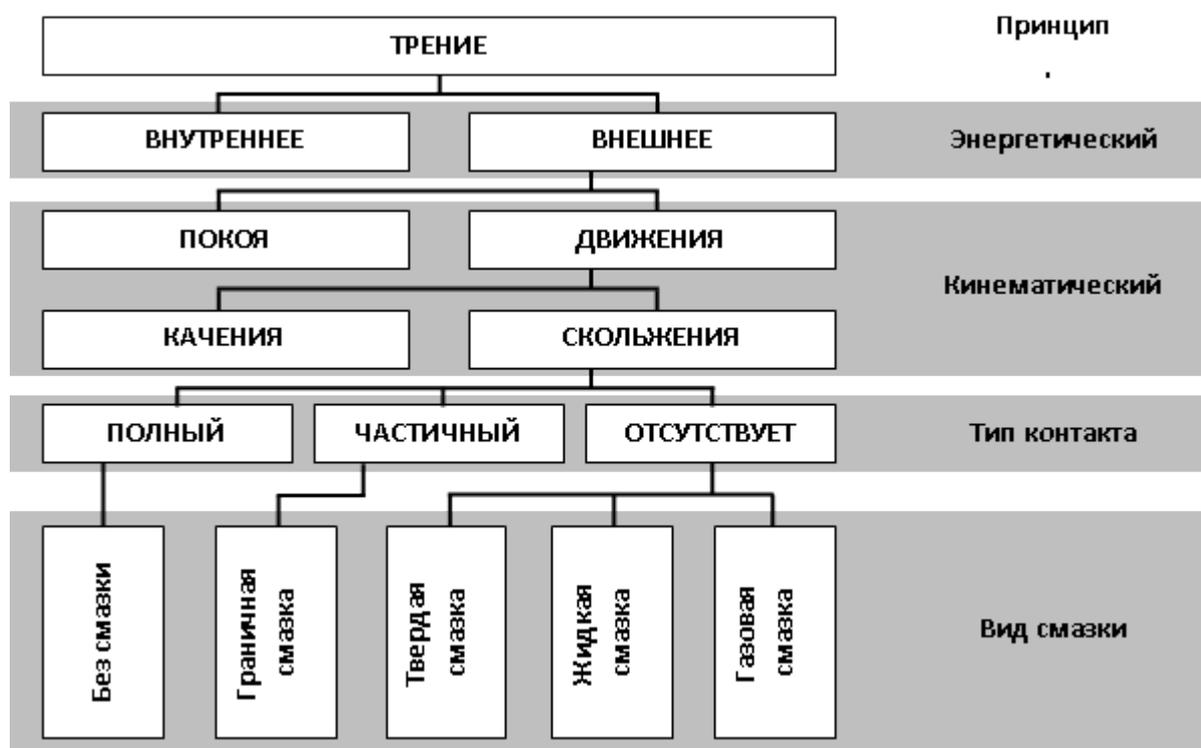


Рисунок 1 – Классификация видов трения

**Трение покоя** – трение двух тел при микросмещениях без макросмещения.

**Трение движения** – трение двух тел, находящихся в движении относительно друг друга.

**Трение скольжения** – трения движения, при котором скорости тел в точке касания различны по значению и (или) направлению.

**Трение качения** – трения движения, при котором скорости соприкасающихся тел одинаковы по значению и направлению, по крайней мере, в одной точке касания.

**Трение качения с проскальзыванием** – трение движения двух соприкасающихся тел при одновременно трении качения и скольжения в зоне контакта.

Таким образом, виды трения классифицируются:

**1. По наличию относительного движения:**

- трение покоя;
- трение движения.

**2. По характеру относительного движения:**

- трение скольжения;
- трение качения;
- трение качения с проскальзыванием.

**3. По наличию смазочного материала:**

- трение без смазочного материала;
- трение со смазочным материалом.

## **2.2. Трение покоя без смазочного материала**

Возникновение трения покоя имеет следующие причины. При контакте поверхностей на площади фактического контакта имеют место упругие и пластические деформации микронеровностей и межмолекулярное взаимодействие (адгезия).

Соответственно выделяют **деформационную (механическую)** и **адгезионную (молекулярную)** составляющие силы трения.

## **2.3. Трение скольжения без смазочного материала**

Трение скольжения, как и трение покоя, имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Сила трения складывается из сопротивления, обусловленного деформированием тонкого поверхностного слоя внедрившихся микронеровностей, и сопротивления, возникающего вследствие межмолекулярных взаимодействий в достаточно сближенных участках твердых тел.

При трении скольжения по сравнению с трением покоя имеют место новые явления:

- динамическое силовое нагружение материала поверхностных слоев;
- разрыв адгезионных связей, как по поверхности контакта, так и в глубине материала;
- нагрев материала поверхностных слоев и, как следствие, активизация адсорбционных, диффузионных, химических и т. п. процессов;
- изнашивание материала.

Величина коэффициента трения скольжения находится в диапазоне от 0,001 при реализации эффекта аномально низкого трения до значений, превосходящих единицу при трении металлов в вакууме. Соотношение молекулярной и механической составляющих меняется от 50... 100 для чистых металлов до 2... 20 для полимеров.

Трение скольжения без смазочного материала встречается:

- в узлах машин, где смазочный материал во избежание порчи продукции или по соображениям безопасности недопустим (текстильная, пищевая, химическая промышленность);
- при высоких и низких температурах;
- высоком и сверхвысоком вакууме;
- при высоком уровне радиации.

## 2.4. Трение качения без смазочного материала

Для характеристики сопротивления при качении вводится величина, называемая **коэффициентом трения качения**, которая определяется как отношение движущего момента при равномерном качении к нормальной нагрузке и, в отличие от коэффициента трения скольжения, является размерной и измеряется в единицах длины. Для различных материалов она изменяется от 0,001 см (закаленная сталь – закаленная сталь) до 0,1 см (дерево – дерево).

Основными причинами, вызывающими трение качения (потери при качении) являются:

- относительного упругое проскальзывание сопряженных поверхностей (микроскальзывание). Оно связано с разной величиной упругих деформаций поверхностных слоев контактирующих тел в зоне контакта в направлении движения;
- дифференциальное проскальзывание. В общем аналогично предыдущему случаю, но рассматривается в плоскостях, перпендикулярных направлению движения и в основном играет роль при качении шара в желобе;
- несовершенство упругих свойств материала – упругий гистерезис выражающееся в неполном возврате материалом при разгрузочной энергии, которая была затрачена на его деформирование при нагружении;
- пластическая деформация поверхностных слоев, в том числе на площади фактического контакта;

- молекулярное взаимодействие контактирующих поверхностей, препятствующее их сближению на передней кромке контакта и разъединению на задней (адгезия).

Соотношение перечисленных составляющих сопротивления качению зависит от многих факторов, в том числе от материалов контактирующих тел и окружающей среды. Так, например, при качении твердых металлов по резине основной вклад вносят потери на упругий гистерезис, при качении в вакууме – молекулярное взаимодействие.

Наряду с полезными свойствами, трение является во многих устройствах и механизмах вредным сопротивлением, которое отнимает львиную долю мощности и энергии у машин. Для уменьшения трения в механизмах конструкторам приходится применять различные приемы и способы, чтобы снизить непродуктивные потери энергии.

**Трением покоя** называется трение двух тел при начальном (бесконечно малом) относительном перемещении в момент перехода от состояния покоя к состоянию относительного движения. Это явление можно объяснить шероховатостью поверхностей соприкасающихся тел, а также их деформацией, вызванной взаимным давлением друг на друга.

**Трением движения** называется трение двух тел, находящихся в относительном движении. Рассмотрим основные виды трения в зависимости от характера относительного движения тел.

**Трением скольжения** называется трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по значению и (или) направлению. Трение скольжения, как и трение покоя, обусловлено, прежде всего, шероховатостью и деформацией поверхностей, а также наличием молекулярного сцепления прижатых друг к другу тел. Трение скольжения сопровождается изнашиванием, т. е. отделением или остаточной деформацией материала, а также нагревом трущихся поверхностей тел (остаточной называется деформация, не исчезающая после прекращения действия внешних сил).

***Сила трения скольжения возникает при скольжении одного тела по поверхности другого.***

**Сила трения скольжения зависит:**

- от нагрузки;
- от качества обработки поверхностей взаимодействующих тел.

**Трение качения.** ***Сила трения качения возникает при качении одного тела по поверхности другого.*** Сопротивление, возникающее при качении одного тела по-другому, называется трением качения. Часто в различных механизмах, да и просто в быту стараются заменить трение скольжения трением качения. Оно обусловлено деформациями этих тел. Формула для определения момента трения качения аналогична формуле для определения силы трения в поступательной паре (коэффициент трения качения, как и коэффициент трения скольжения, является справочным материалом – определяется экспериментально). Однако надо помнить, что коэффициент трения качения величина размерная – имеет линейную размерность (м, см, мм).

Если силы трения действуют между различными соприкасающимися телами (например, между телом и плоскостью, по которой оно движется или находится в покое), то такое трение называется **внешним**. Чисто внешнее трение является **сухим трением**, оно возникает в том случае, если между телами отсутствует слой смазки.

Силы сухого трения возникают не только при скольжении одного тела по поверхности другого, но и при попытке вызвать такое скольжение. Существует три вида внешнего трения: *трение покоя*, *трение скольжения* и *трение качения*. Существование трения покоя является характерной особенностью сухого трения.

Силы сухого трения существенно зависят от **степени обработки соприкасающихся поверхностей, их чистоты и относительной скорости**.

Характерная особенность этих сил заключается в том, что сила трения не обращается в нуль и тогда, когда относительная скорость тел становится равной нулю. Сила трения, которая существует между телами, которые соприкасаются, но не движутся под действием приложенной силы, носит название силы трения покоя.

**Таким образом, трение скольжения происходит тогда, когда одно тело, имея скорость по отношению другого, неподвижного тела, за все время движения соприкасается с ним определенной частью своей поверхности и скользит по нему.**

Трение называется **вязким**, если оно существует между поверхностью твердого тела и окружающей его жидкой или газообразной средой, в которой оно движется, а также трение между различными слоями такой среды. Иногда вязкое трение называют *жидким трением*.

Поскольку силы вязкого трения возникают между различными частями одного и того же тела (например, в жидкостях и газах), скорости слоев которых непрерывно меняются от слоя к слою, то такое трение является **внутренним трением**. При движении тел в жидкостях и газах на них действуют силы внутреннего (вязкого) трения и силы нормального давления со стороны среды.

Суммарная сил давления, действующих на тело со стороны среды, имеет составляющую, направленную против движения тела. Данная составляющая получила название **силы сопротивления среды**. Для сил вязкого трения характерно отсутствие сил трения покоя, потому что силы вязкого трения обращаются в нуль, когда относительная скорость движения слоев среды оказывается равной нулю. В этом легко убедиться на следующих примерах. Человек может привести в движение тяжелую баржу относительно воды, если он будет тянуть за канат, привязанный к ней; легкий порыв ветра приводит в движение поплавков удочки. Зависимость силы вязкого трения от скорости движения изображена на рисунке 2.

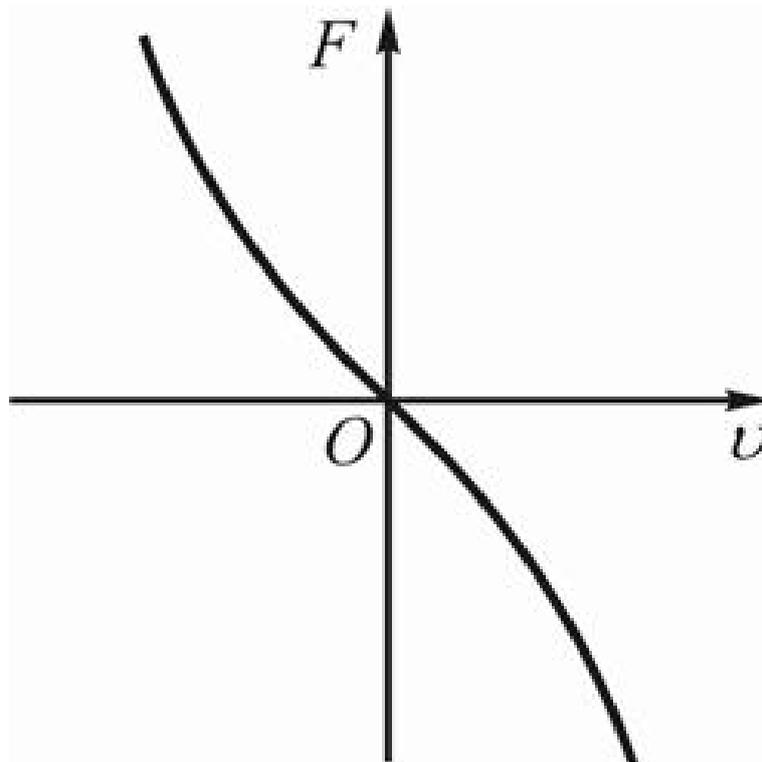


Рисунок 2 – Зависимость силы вязкого трения от скорости движения

Сила вязкого трения с увеличением скорости в пределах относительно небольших скоростей растет сначала линейно, а затем пропорционально квадрату скорости. Для малых скоростей сила вязкого трения:  $F = f_1 v$ .

При достаточно больших скоростях сила вязкого трения изменяется по квадратичному закону:  $F = f_2 v^2$ .

Коэффициенты  $f_1$  и  $f_2$  в значительной степени зависят от формы и размеров тела, направления его движения, состояния поверхности тела и от свойств окружающей среды.

**Силами трения** называют силы, возникающие при соприкосновении поверхностей двух тел или частей одного тела и препятствующие их взаимному перемещению. Они приложены к телам (или к их частям) вдоль поверхности соприкосновения и всегда направлены в сторону, противоположную относительной скорости движения.

Силы трения отличаются от рассматриваемых в механике сил всемирного тяготения и упругих сил тем, что эти силы зависят не только от **конфигурации тел**, т. е. от их взаимного расположения, но также еще от **относительных скоростей тел**, между которыми они действуют. Отметим, что силы трения зависят от многих факторов, которыми сопровождается движение тел при наличии трения. В связи с этим описание сил трения возможно лишь при помощи эмпирически найденных приближенных законов, которые часто являются довольно грубыми.

## 2.5. Причины возникновения силы трения

**Сила трения** – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под воздействием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между этими телами.

Зависимость силы трения, возникающей между двумя телами от их относительного перемещения, представлена на рисунке 3.

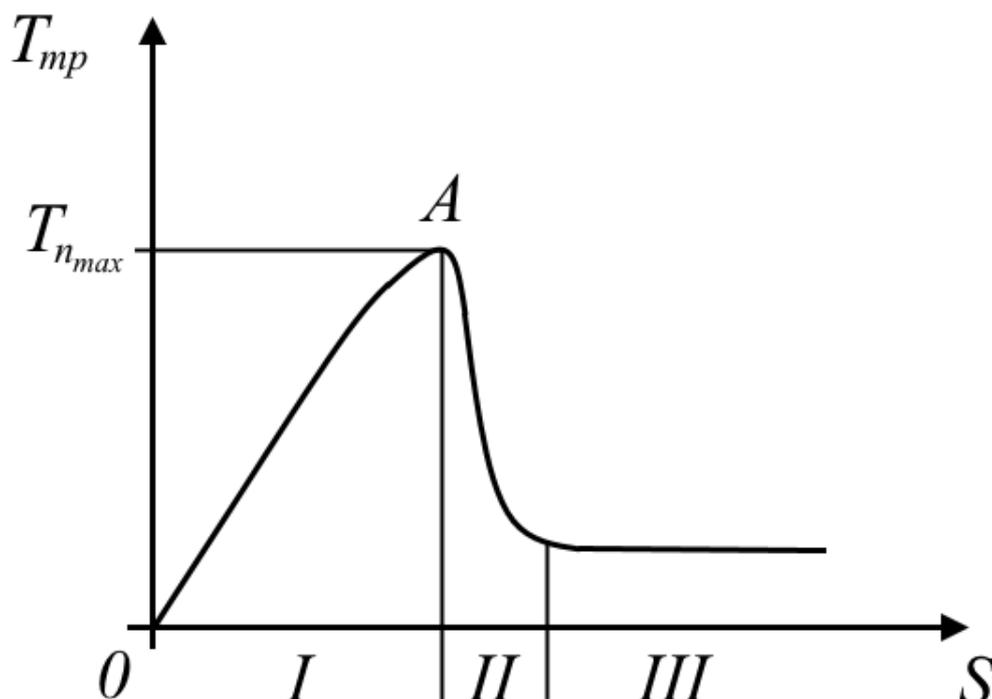


Рисунок 3 – Зависимость силы трения от относительного перемещения двух тел:

*I* – участок предварительного смещения соответствует трению покоя;  
*II* – участок срыва соответствует началу скольжения (переходу от состояния покоя к устойчивому скольжению); *III* – участок устойчивого скольжения – соответствует трению скольжения

Точкам на отрезке *OA* соответствует неполная сила трения покоя.

Точке *A* – наибольшая сила трения покоя, т. е. сила трения покоя, любое превышение которой ведет к началу макросмещения, т. е. скольжению.

В качестве безразмерной характеристики трения покоя вводится величина, называемая коэффициентом сцепления, равная отношению наибольшей силы трения покоя двух тел к нормальной относительно поверхностей трения силе, прижимающей тела друг к другу.

Величина предварительного смещения не превосходит размера пятен фактического контакта. Но даже при таких малых смещениях возможно разрушение поверхности стыка. Его стремятся уменьшить за счет увеличения сцепления.

Коэффициент сцепления обычно находится в диапазоне 0,1...0,6 и в наибольшей степени зависит от микрогеометрии поверхности (до трех раз).

Механические свойства материалов и, в особенности, нагрузка оказывают значительно меньшее влияние.

Изучения трения покоя связано с тем, что узлы, в которых оно реализуется, являются наиболее распространенными в технике. К ним относятся все сочленения, в которых внешнее трение используется для предотвращения относительного скольжения деталей, например:

- неподвижные соединения (прессовые, с натягом, болтовые, заклепочные);
- соединение нитей в тканях;
- фрикционные устройства (ременные и фрикционные передачи);
- сочленение колесо-рельс, колесо-дорожное покрытие.

Во всех этих примерах требуется наибольший в данных условиях коэффициент сцепления.

Сила трения возникает между поверхностями двух взаимодействующих тел. Если одно тело движется по поверхности другого, сила трения всегда направлена против движения. Рассмотрим эту ситуацию подробнее.

Часто приходится слышать фразы: «Не сотри ноги!», «Сотри, пожалуйста, с доски!». Что при этом имеется в виду? Какое явление скрывается за подобными фразами?

Когда поверхность одного тела движется по поверхности другого тела, то, даже если нам не видны бугорки, трещины, царапины, неровности – **шероховатости на поверхностях тел**, они начинают задевать друг за друга. Это и есть одна из причин возникновения силы трения (рис. 4).

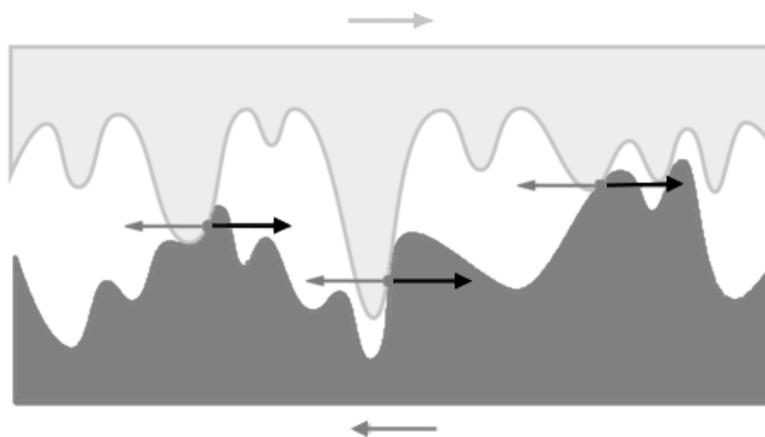


Рисунок 4 – Шероховатости на поверхностях тел – первая причина появления силы трения

Существует еще одна причина, по которой появляется сила трения. Опыт показал, что если начать устранять неровности на поверхностях трущихся тел, тщательно шлифуя их, то вначале сила трения, как и ожидается, будет уменьшаться. Но когда поверхности тел будут приближаться к идеально гладким, сила трения резко возрастет, тела начнут буквально прилипать друг к другу. Это происходит потому, что **молекулы** идеально гладких поверхностей начинают располагаться настолько близко друг к другу, что между ними начинают действовать силы взаимного притяжения (рис. 5).

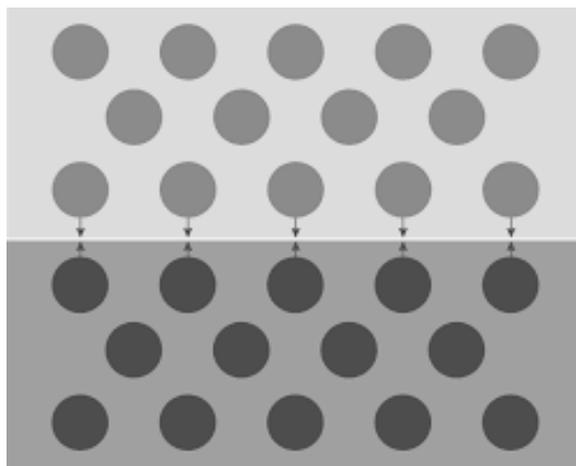


Рисунок 5 – Взаимное притяжение молекул – вторая причина появления силы трения

На практике чаще всего приходится сталкиваться с силой трения, вызванной шероховатостями на поверхностях тел.

## 2.6. Трение характеризуется силой трения

Сила трения есть сила сопротивления относительно перемещению двух тел при трении.

Коэффициент трения скольжения определяют опытным путем; значения его для различных условий приведены в справочниках. Примеры коэффициентов трения для некоторых материалов:

Металл по металлу без смазки.....	0,15...0,30
То же, со смазкой .....	0,10...0,18
Дерево по дереву без смазки.....	0,40...0,60
Кожа по чугуну без смазки .....	0,30...0,50
То же, со смазкой .....	0,15
Сталь по льду.....	0,02

Коэффициент трения скольжения при движении обычно меньше, чем при покое, и в первом приближении не зависит от скорости относительного перемещения тел.

Методы решения задач статики при наличии трения остаются такими же, как и при отсутствии его, причем в уравнения равновесия обычно вводят максимальные значения сил трения.

### 3. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Так как применение большинства твердых материалов определяется в первую очередь их механическими свойствами, то из всего разнообразия физических свойств механические свойства твердых тел являются наиболее важными в изучении. Человечество всегда использовало и будет использовать твердые тела. Но если раньше физика твердого тела не поспевала за развитием технологии, основанной на непосредственном опыте, то теперь положение изменилось. Теоретические исследования начинают приводить к созданию твердых тел, свойства которых совершенно необычны, и получить которые методом «проб и ошибок» было бы невозможно. Создание таких устройств, как транзисторы, а затем – электронные микросхемы – яркий пример того, как понимание структуры твердых тел привело к революции во всей радиотехнике и электронике. Современная техника нуждается в прочных и долговечных материалах с разнообразными механическими и другими свойствами. Чтобы создавать такие материалы, чтобы изменять их свойства в нужном направлении, важно знать, что происходит в реальных твердых телах под действием внешней механической нагрузки, то есть необходимо знать механизм деформации и разрушения. Создание материалов с заданными механическими, магнитными, электрическими и другими свойствами – одно из основных направлений современной физики твердого тела. Приблизительно половина физиков мира работает сейчас в области физики твердого тела.

Твердые тела сохраняют не только свой объем, как жидкости, но и форму. Твердые тела находятся преимущественно в кристаллическом состоянии.

#### 3.1. Кристаллические тела

Кристаллы – это твердые тела, атомы и молекулы которых занимают определенные упорядоченные положения в пространстве. Следствие этого – правильная внешняя форма кристалла.

Правильная внешняя форма – не единственное, и даже не самое главное следствие упорядоченного строения кристалла. Главное – это зависимость физических свойств от выбранного в кристалле направления. Прежде всего, бросается в глаза различная механическая прочность кристалла по разным направлениям. Например, легко расслаиваются по одному направлению кристаллы графита, строение которых имеет слоистую структуру. Слои образованы рядом параллельных плоских сеток, состоящих из атомов углерода. Атомы располагаются в вершинах правильных шестиугольников. Расстояние же между слоями сравнительно велико, поэтому связи между слоями менее прочны, чем связи внутри них. Многие кристаллы по-разному проводят теплоту и электрический ток в различных направлениях. Зависят от направления и оптические свойства кристаллов. Зависимость физических свойств от направления внутри кристалла называют **анизотропией**. Все кристаллические тела анизотропны.

Например, кусок слюды легко расслаивается в одном из направлений на тонкие пластинки, но разорвать его в направлении, перпендикулярном пластинкам, труднее (рис. 6).

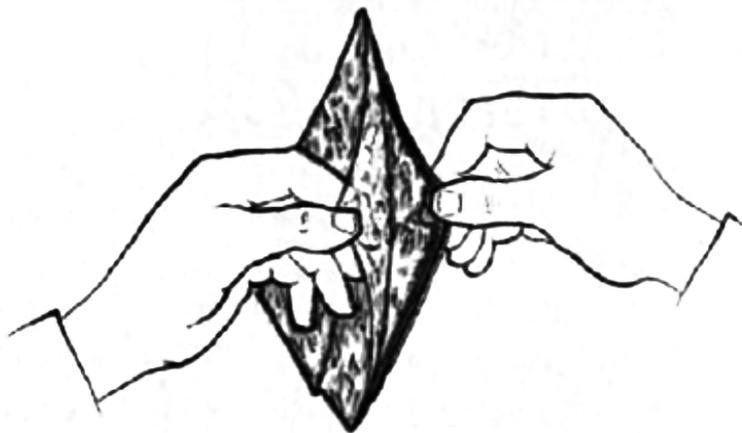


Рисунок 6 – Расслоение слюды

Когда вы пишете карандашом, такое расслоение происходит непрерывно и тонкие слои графита остаются на бумаге (рис. 7).

Твердое тело, состоящее из большого числа маленьких кристалликов, называют поликристаллическим. Типичные представители поликристаллов – металлы. На первый взгляд их кристаллическое строение никак не проявляется. Большой кусок металла анизотропен. Дело в том, что кристаллики ориентированы друг по отношению к другу хаотически. В результате в объеме, значительно превышающем объем отдельных кристалликов, все направления внутри металлов равноправны и их свойства одинаковы по всем направлениям. Каждый же кристаллик анизотропен. Одиночные кристаллы называют монокристаллами.

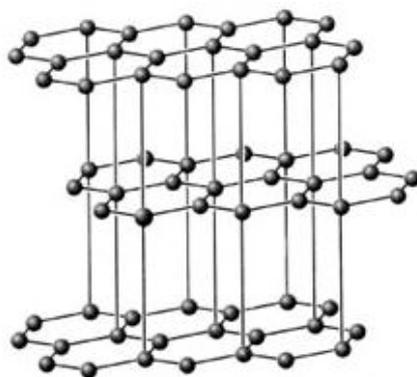


Рисунок 7 – Кристаллическая решетка графита

### 3.2. Аморфные тела

**Аморфными** называют вещества, не обладающие в конденсированном состоянии кристаллическим строением, но обладающие, в отличие от жидкостей, упругостью формы (модуль сдвига не равен нулю). В аморфном состоянии могут находиться, например, обычные (неорганические) стекла, сера, селен, глицерин и большинство высокомолекулярных соединений. У аморфных тел, в отличие от кристаллических, нет строгого порядка в расположении атомов. Только ближайшие атомы располагаются в некотором порядке. Но строгой повторяемости во всех направлениях одного и того же элемента структуры, которая характерна для кристаллов, в аморфных телах нет. Все аморфные тела **изотропны** – их физические свойства одинаковы по всем направлениям. Аморфные вещества при определенных условиях **стеклуются**, т. е. переходят от свойств и закономерностей жидкого состояния к свойствам и закономерностям твердого состояния. Переход аморфного вещества из жидкого состояния в твердое при изменении температуры или давления называется **структурным стеклованием**. При таком переходе меняются объем, теплосодержание, а также механические, электрические и другие свойства вещества. Атомы и молекулы аморфных тел, подобно молекулам жидкости, имеют определенное время «оседлой жизни» – время колебания около положения равновесия. Но в отличие от жидкостей, это время у них весьма велико. При низких температурах аморфные тела по своим свойствам напоминают твердые тела. Но по мере повышения температуры их свойства все более и более приближаются к свойствам жидкостей. Переход из твердого состояния в жидкое при повышении температуры называют **размягчением**. При этом постепенно учащаются перескоки атомов из одного положения равновесия в другое. Стеклование и размягчение совершаются в довольно широкой температурной области – до нескольких десятков градусов. Поэтому в отличие от кристаллических тел, аморфные тела не обладают какой-то определенной температурой плавления. Кристаллические и аморфные вещества отличаются степенью упорядоченности и внутреннего строения. В кристаллических веществах все частицы располагаются в определенном порядке, а в аморфных веществах этот порядок относительный (рис. 8).

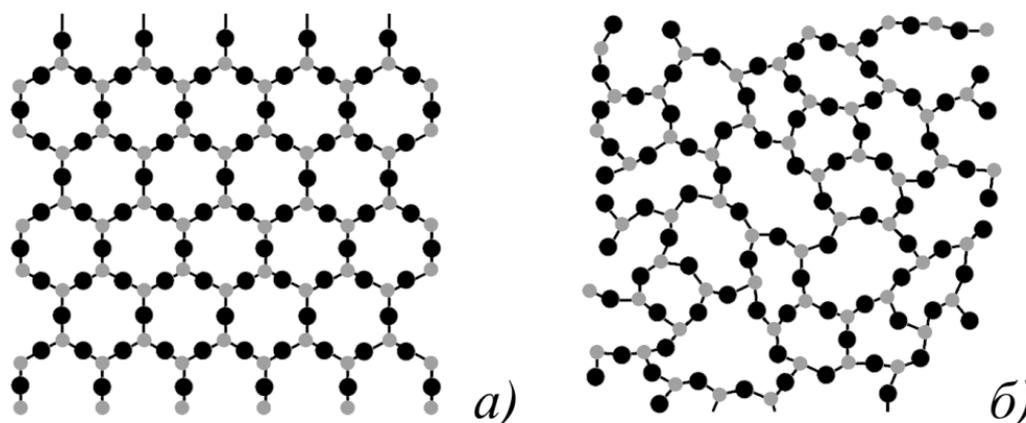


Рисунок 8 – Структура кварца:  
а) – кристаллическая; б) – аморфная

## 4. МИКРОГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТИ

### 4.1. Геометрические характеристики поверхности

Под поверхностью детали в технике понимается наружный слой, который по строению и свойствам отличается от внутренних слоев. Трение и изнашивание связаны с взаимодействием поверхностей контактирующих твердых тел. Совокупность геометрических и физико-химических свойств поверхностного слоя, определяющая эксплуатационные показатели детали, **называется качеством поверхности**. Термин «качество поверхности» в технике используется для характеристики комплекса свойств, приобретенных поверхностью в результате ее обработки. Качество поверхности деталей характеризуется микро- и макрогеометрией поверхности, волнистостью, структурой, упрочнением и остаточным напряжением.

Как бы ни была совершенна обработка поверхности, она приводит к отклонениям профиля от геометрической формы, заданной чертежом детали.

Выделяют четыре основных вида отклонений (погрешностей): **макроотклонения, волнистость, шероховатость, субмикрощероховатость**.

**Макроотклонения** – нерегулярные отклонения поверхности от формы, заданной чертежом (бочкообразность, конусность, неплоскость, огранка и т. п.). Такие отклонения обычно обусловлены недостаточной точностью станка и инструмента, неправильным режимом обработки, температурными напряжениями.

**Волнистость** – более или менее периодические микроотклонения от геометрической формы детали, практические равные по размерам выступы и впадины. Характеризуются шагом (1...10 мм) и высотой (от 0,001 до 0,1 мм). Обусловлена волнистость низкочастотными колебаниями системы.

**Шероховатость** – микроотклонения геометрического профиля волнистой поверхности. Шаг шероховатости от 2 до 800 мкм, высота – от 0,03 до 400 мкм. Шероховатость обусловлена геометрией инструмента и его износом, свойствами материала, колебаниями в системе. Чтобы различать волнистость и шероховатость вводится понятие базовой длины. Если шаг больше базовой длины, то это – волнистость.

**Субмикрощероховатость** – более мелкая шероховатость (на два-три порядка), имеющаяся на поверхностях микронеровностей. Обусловлена внутренним несовершенством материала, неравномерностью деформирования отдельных зерен при механической обработке или трении.

Схематически отклонения представлены на рисунке 9.

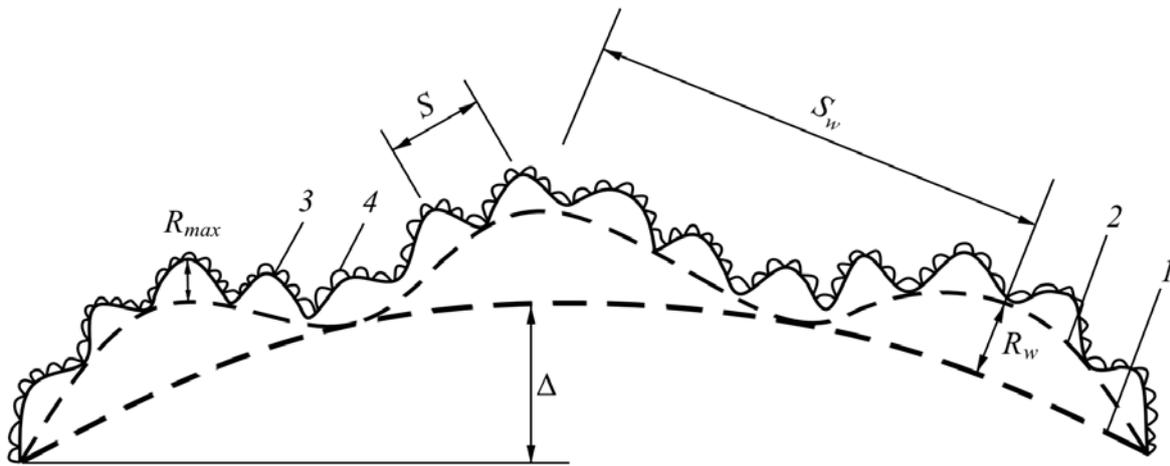


Рисунок 9 – Виды отклонений:

- 1 – макроотклонения; 2 – волнистость; 3 – шероховатость;  
4 – субмикрощероховатость

Параметры шероховатости регламентированы ГОСТ 2784-73, в котором имеется 14 классов шероховатости поверхности. Количественно шероховатость оценивается по неровностям профиля, получаемого путем сечения реальной поверхности плоскостью (рис. 10).

Для отделения шероховатости от других неровностей ее рассматривают в пределах ограниченного участка, длина которого называется базовой длиной.

$l$  – базовая длина ограниченного участка, в пределах которого рассматривают шероховатость, чтобы отделить ее от других неровностей.

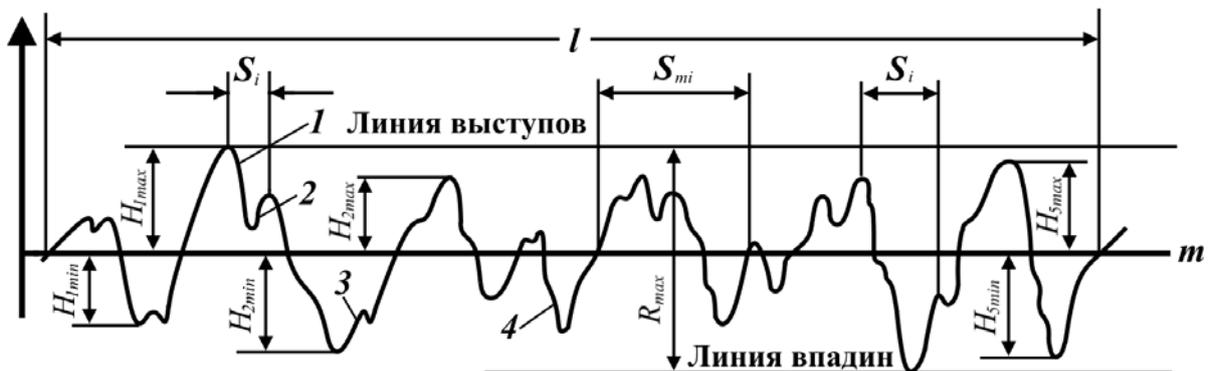


Рисунок 10 – Действительный профиль (профилограмма) поверхности:

- 1 – выступ профиля; 2 – местная впадина; 3 – местный выступ;  
4 – впадина профиля

$R_a$  и  $R_z$  – главные показатели шероховатости поверхности.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

где отклонение от профиля  $y$  – расстояние от точек профиля до средней линии, измеренное по нормали к ней;

$R_a$  – среднее арифм. отклонение профиля;

$R_z$  – высота неровностей профиля по 10 точкам – сумма среднеарифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших максимумов и пяти наибольших минимумов, находящихся в пределах базовой длины.

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |H_{imax}| + \sum_{i=1}^5 |H_{imin}| \right),$$

где  $H_{imax}$  и  $H_{imin}$  определяются относительно средней линии.

## 4.2. Контакт поверхностей

При соприкосновении твердых тел вследствие отклонений их поверхностей от правильной геометрической формы контактирование осуществляется на отдельных участках. В соприкосновении обычно входят самые высокие микронеровности.

Их суммарная площадь контакта называется **фактической площадью контакта (ФПК)** и обозначается  $A_f$ .

В зависимости от величины нагрузки, приходящейся на каждую микронеровность, механических свойств материалов и геометрической формы неровностей на ФПК могут иметь место упругие, упругопластические и пластические деформации.

Усилие через дискретные контакты, образованные микронеровностями, передаются волнам, на которых эти неровности расположены. Волны, как правило, деформируются упруго. Совокупность пятен контакта на вершинах волн образует участки, которые называются **контурной площадью контакта** и обозначаются  $A_c$ .

Площадь контакта, которая имела бы место между телами, выполненными идеально, т. е. без отклонений называется **номинальной площадью контакта** и обозначается  $A_n$ .

Фактическая площадь контакта составляет обычно 0,01...0,1 % от номинальной, а контурная – 5...20 %. При контакте плоских поверхностей номинальная площадь равна площади меньшего тела и не зависит от нагрузки. При контакте неплоских поверхностей номинальная площадь рассчитывается по формулам контактной задачи теории упругости и зависит от нагрузки.

### 4.3. Нагрузка, скорость и температура в контакте

В соответствии с введенными площадями контакта различают фактическое  $P_f$ , контурное  $P_c$  и номинальное  $P_a$  давление, которые равны частному от деления нормальной нагрузки на соответствующую площадь. Наибольшим по величине является фактическое давление, которое при пластическом контакте микронеровностей приближается к твердости материала. Если увеличивать нормальную нагрузку или номинальное давление, то контурное давление увеличивается незначительно, а фактическое практически не меняется, что происходит из-за подключения новых высоких выступов.

Для описания относительного перемещения трущихся тел, движущихся с различными скоростями, наиболее широко используется скорость скольжения, под которой понимают разность тангенциальных скоростей тел в точках их касания при скольжении. Абсолютная величина суммы тангенциальных скоростей тел в точках их касания называется суммарной скоростью контактирующих точек относительно зоны контакта или суммарной скоростью качения в контакте.

Разнообразные механизмы взаимодействия поверхностей при трении приводят к тому, что значительная часть, до 98 %, механической работы по перемещению одного тела относительно другого преобразуется в теплоту. Дискретность контакта из-за наличия микрошероховатости приводит к тому, что теплота генерируется на пятнах фактического контакта, а затем передается в объем тел и далее в окружающую среду. Из-за малой фактической площади контакта температура на пятнах микроконтакта много выше, чем была бы при контакте тел по номинальной площади. Это может привести к местному размягчению и расплавлению материала. Тепло распространяется от пятен контактов вглубь обоих контактирующих тел, причем тепловые потоки распределяются в зависимости от теплофизических свойств контактирующих тел, их размеров и условий теплопровода. На теплоотвод решающее влияние оказывает коэффициент взаимного перекрытия, представляющей собой отношение площадей трения контактирующей пары. Эта важная характеристика была впервые введена А. В. Чичинадзе.

## **5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТРУЩИХСЯ ТЕЛ**

Для обеспечения заданного ресурса любой машины или механизма наряду с требованиями выбора оптимального сочетания материалов деталей пар трения, условиями их смазки, точности изготовления важное значение имеет качество поверхности.

### **5.1. Остаточные напряжения и микротвердость**

**Остаточные напряжения** – это напряжения, которые существуют в теле при отсутствии внешних силовых воздействий на него.

- неравномерность температуры по объему тела;
- пластические деформации поверхностных слоев;
- неоднородные по объему структурные превращения;
- наличие включений.

Остаточные напряжения могут возникать и уравниваться в различных по размеру объемах соизмеримых с размером детали, одного или нескольких кристаллических зерен, небольшой группы атомов. Знак напряжений (растяжение или сжатие) в поверхностном слое зависит от того, какой из факторов, вызывающих их появление, превалирует. При трении остаточные напряжения изменяют напряженное состояние поверхностного слоя приводят к появлению дефектов кристаллической решетки и понижению прочности. Под влиянием пластической деформации, имеющей место при механической обработке и трении, как правило, механическая прочность и микротвердость поверхностных слоев увеличивается по сравнению с основным материалом.

Но также могут происходить процессы, понижающие прочность:

- разрыхление деформируемого слоя;
- генерация температуры.

В результате в процессе трения микротвердость наиболее близких к поверхности слоев снижается и формируется положительный градиент механических свойств по глубине, способствующий протеканию внешнего трения.

### **5.2. Поверхностная энергия**

Поверхностный слой твердого тела обладает большой активностью. Это обусловлено тем, что внутри тела каждый атом кристалла окружен другими атомами и связан с ними точно во всех направлениях, а у атомов,

расположенных на поверхности, с внешней стороны нет соседей в виде таких же атомов. Поэтому **в поверхностном слое у атомов твердого тела остаются свободные связи**, наличие которых создает вблизи поверхности атомное (молекулярное) притяжение. На частицу, расположенную на поверхности, действуют несимметричные силы, равнодействующая которых направлена внутрь тела. Такое силовое взаимодействие вызывает искажение строения поверхностного слоя. Поверхностные атомы вследствие свободных связей обладают большей энергией, нежели атомы внутри тела.

**Поверхностная энергия/удельная поверхностная энергия**, это избыток энергии, отнесенный к единице поверхности.

При соприкосновении двух тел поверхностная энергия может выделяться в виде теплоты или затратиться на подстройку в кристаллической решетке одного кристалла к другому.

### 5.3. Адсорбция и хемосорбция

**Адсорбция (физическая)** – это образование пленки на поверхности твердого тела.

Пленка состоит из веществ, содержащихся в окружающей среде:

- газов;
- паров воды;
- паров других жидкостей;
- других веществ, растворенных в этих жидкостях.

Пленка образуется в результате взаимодействия ненасыщенных силовых полей твердого тела с силовыми полями молекул **газа**, движущегося к твердой поверхности, или взаимодействия **жидкости**, соприкасающейся с твердым телом.

Наибольшей способностью к адсорбции обладают поверхностно-активные вещества (ПАВ). **Поверхностно-активные вещества** – это вещества, молекулы которых ориентируются при адсорбции перпендикулярно поверхности, органические кислоты, металлические мыла органических кислот, спирты, смолы.

Молекулы адсорбированных веществ обладают способностью перемещаться по поверхности твердого тела из областей, где имеется их избыток, до полного покрытия поверхности.

Адсорбция бывает не только физическая, но и химическая (**хемосорбция**). При химической адсорбции (хемосорбция) полярные концы молекул, связанных с поверхностью тела, образуют с ней монослой, сходный с химическим соединением. Подвижность молекул в результате этого значительно уменьшается.

Хемосорбция, в отличие от физической адсорбции, имеет избирательный характер. Она протекает с большей интенсивностью в местах нарушения регулярности кристаллической решетки.

Во многих случаях физическая и химическая адсорбция протекают одновременно, но одна из них, в зависимости от конкретных условий (твердое тело, вещество, температура и т. д.) является преобладающей.

#### **5.4. Эффект Ребиндера (эффект адсорбционного понижения прочности)**

Адсорбция молекул, особенно молекул ПАВ, приводит к понижению поверхностной энергии, а разрыхление поверхностного слоя, имеющее место при трении, облегчает проникновение молекул вглубь материала, что создает условия для проявления **эффекта Ребиндера**. Различают **внешний и внутренний адсорбционные эффекты понижения прочности**.

**Внешний эффект** вызывает пластификацию поверхности и снижение предела текучести. Благодаря понижению поверхностной энергии облегчается выход дислокаций на поверхность.

**Внутренний эффект** вызывается адсорбцией ПАВ на внутренних поверхностях раздела – зародышевых микротрещинах разрушения, возникающих в процессе деформации твердого тела. Это уменьшает энергию, необходимую для роста трещин, и оказывает расклинивающее действие в устье, способствуя их раскрытию.

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

#### **5.5. Диффузия и химическая активность**

**Диффузия** – самопроизвольное перемещение атомов или молекул в газах, жидкостях или твердых телах. Диффузионные процессы в поверхностных слоях твердых тел протекают значительно интенсивнее, чем в основном материале, особенно при трении. Это связано с повышенным содержанием дефектов, высокими температурами, наличием градиентов концентрации, напряжения и температуры. При трении имеют место практически **все виды диффузии**:

- самодиффузия;
- гетеродиффузия;
- диффузия в градиенте температур и напряжений;
- поверхностная диффузия из газовых, жидких и твердых источников;
- реактивная диффузия, связанная с фазовыми превращениями и химическими реакциями.

**Химическая активность (реакционная способность)** поверхностных слоев при трении по сравнению с основным материалом повышается во много

раз. Причиной этого является интенсификация диффузионных процессов и причины, приводящие к ней. В результате протекания химических и электрохимических реакций на поверхности трущихся тел образуются пленки химических соединений, например, окислов и происходит растворение отдельных структурных составляющих.

## 5.6. Адгезия

**Адгезия** – это возникновение молекулярной связи между поверхностными слоями соприкасающихся твердых тел.

Все твердые тела имеют поверхностное поле сил, поэтому они должны подвергаться адгезии. Однако сила или энергия адгезионного взаимодействия различны для разных сочетаний материалов. Большое влияние также оказывают различные пленки на поверхностях тел (окисные, адсорбционные), которые обычно снижают адгезию.

При адгезии поле сил экспоненциально уменьшается с увеличением расстояния от поверхности, поэтому для адгезионного сцепления необходимо соответствующее сближение. При контакте реальных твердых тел адгезия может существовать только на площади фактического контакта и на уровне контакта субмикрощероховатостей.

## 5.7. Структура поверхности

В результате протекания описанных выше процессов поверхностные слои деталей имеют сложную слоистую структуру, изображенную на рисунке 11.

Такое строение поверхностных слоев приводит к тому, что контакт поверхностей при трении происходит между слоями, существенно отличающимся по свойствам от основного материала.

## 6. ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ

Формирование изнашиваемой поверхности происходит в результате суммирования различных по интенсивности и видам элементарных актов разрушения и изменений механических и физико-механических свойств материала под воздействием таких внешних факторов, как среда, температура, давление, вид трения, скорость относительного перемещения и т. д. Совокупность явлений в процессе трения определяет вид изнашивания и его интенсивность.

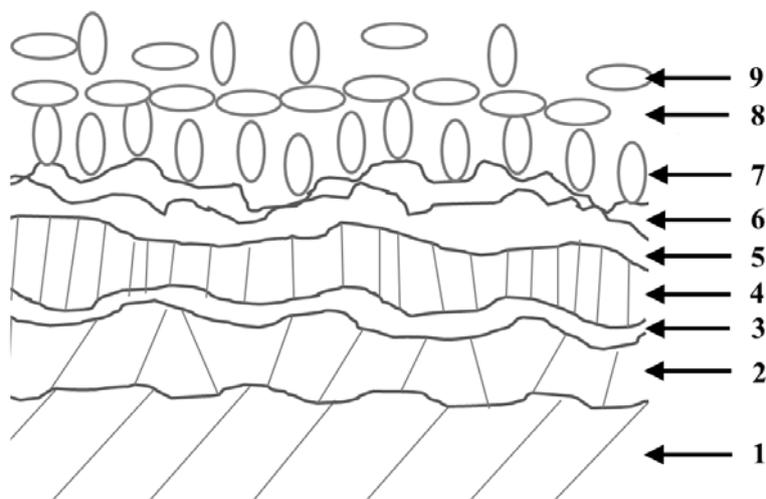


Рисунок 11 – Структура поверхности:

1 – основной материал; 2 – сильно деформированный наклепанный слой с остаточными напряжениями растяжения или сжатия. (Он характеризуется повышенной плотностью дефектов и наличием микротрещин); 3 – слой окислов толщиной 20...200 мкм; 4 – хемосорбированный слой; 5 – слой адсорбированных паров воды; 6 – слой адсорбированных газов; 7 – слой молекул смазочного материала (или ПАВ), ориентированных перпендикулярно поверхности; 8 – слой молекул, ориентированных параллельно поверхности; 9 – слой беспорядочно ориентированных молекул

Вид изнашивания можно установить в первом приближении по внешнему виду поверхности трения. Для точного суждения может потребоваться анализ состава, физических и механических свойств тонких поверхностных слоев.

Виды повреждений не является присущим данной паре трения, а зависит от условий ее работы. Изменение их приводит к изменению вида изнашивания или рабочих поверхностей. При некоторых условиях трения детали пары могут подвергаться разным видам изнашивания.

Изнашивание непосредственно связано со следующими определениями.

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

Скорость изнашивания – отношение значения износа к интервалу времени, в течение которого он возник.

Износостойкость оценивают величиной, обратной интенсивности или скорости изнашивания.

Различают:

- механическое изнашивание – изнашивание в результате механического воздействия;
- коррозионно-механическое изнашивание – изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрохимическим взаимодействием материала со средой.

Классификация видов изнашивания представлена в таблице.

Таблица – Классификация видов изнашивания

Признак классификации	Виды изнашивания
Виды механического изнашивания	<ul style="list-style-type: none"><li>- абразивное, в т. ч.</li><li>- гидроабразивное и</li><li>- газоабразивное,</li><li>- гидроэрозионное,</li><li>- газоэрозионное,</li><li>- кавитационное,</li><li>- усталостное,</li><li>- изнашивание при фреттинге,</li><li>- изнашивание при заедании</li></ul>
Виды коррозионно-механического изнашивания	<ul style="list-style-type: none"><li>- окислительное,</li><li>- изнашивание при фреттинг-коррозии</li></ul>

### 6.1. Абразивное изнашивание

Под абразивным понимается механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел, или твердых частиц.

Различают:

- абразивное изнашивание о закрепленный абразив (например, при обработке резанием);
- изнашивание в абразивной массе, т. е. о незакрепленный абразив (плуги);
- ударно-абразивное изнашивание (шаровые мельницы, камнедробилки);
- гидро- и газоабразивное изнашивание – в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа (рабочие колеса центробежных насосов, стенки трубопроводов);

- контактно-абразивные – в результате действия абразивных частиц, находящихся в зазоре сопряженных деталей.

Здесь рассматривается только последний вид абразивного изнашивания как наиболее распространенный в машинах. Однако процессы при других его видах являются во многом аналогичными.

Внешним проявлением абразивного изнашивания является наличие рисок (царапин) по всей поверхности трения, обычно ориентированных в направлении движения. При этом риски имеют ровную гладкую поверхность и различимы невооруженным глазом или при небольшом увеличении.

Абразивные частицы могут попасть в зазор пары трения извне, например, через фильтры и уплотнения, или же образоваться при работе машины (нагар в ДВС, частицы изнашивания). Абразивное действие могут оказывать и грубые неровности на поверхностях трения.

Попавшие в зазор частицы под действием нагрузки могут впрессовываться (шаржироваться) в поверхности трения, дробиться на более мелкие фракции, скользить или перекатываться вдоль поверхности.

Вследствие разнообразия форм, размеров, механических свойств абразивных частиц возникает широкий спектр контактных напряжений.

В результате на ФПК могут протекать процессы упругого и пластинного взаимодействия (оттеснения), микрорезания или их сочетаний. Адгезионное взаимодействие при абразивном изнашивании обычно мало.

Наиболее опасным является микрорезание, при котором интенсивность изнашивания от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$ .

Известны следующие методы снижения абразивного изнашивания:

1. Повышение твердости обеих сопряженных поверхностей выше 50 % от твердости абразива любыми способами кроме поверхностного пластического деформирования.
2. В металлических парах трения выбор оптимальной твердости более мягкого сплава (например, баббита), при которой абразивные частицы поглощаются и надежно удерживаются.
3. Применение пластмассовых и резиновых деталей, имеющих низкий модуль упругости и за счет этого снижающих напряжения до уровня упругих.
4. Создание надежных уплотнительных систем и систем фильтрации смазочных материалов и рабочих сред.
5. Снижение концентрации абразивных частиц вблизи зоны трения, например, за счет центробежного эффекта (сепарации).

## **6.2. Усталостное изнашивание**

Под усталостным изнашиванием понимается механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъектов материала поверхностного слоя.

Усталостное изнашивание обычно имеет место в слабозагруженных парах трения, или при малых скоростях скольжения, при практическом отсутствии химического взаимодействия материалов пары трения со средой, когда прочность образующихся адгезионных связей ниже прочности более мягкого материала. Оно может происходить как при трении скольжения, так и при трении качения (качение с проскальзыванием).

К усталостному разрушению поверхностных слоев могут приводить переменные напряжения, возникающие как на ФПК, так и на КПК и НПК.

В первом случае при скольжении одного тела по поверхности другого перед микронеровностями возникают волны из деформированного материала, отдельные участки которых подвергаются сложным напряжениям растяжения – сжатия. После прохождения микронеровности те же участки находятся в растянутом состоянии, в результате на ФПК возникают переменные напряжения.

При упругом взаимодействии неровностей интенсивность изнашивания от  $10^{-10}$  до  $10^{-13}$ , при пластическом – от  $10^{-5}$  до  $10^{-8}$ .

При трении со смазочным материалом протекают два процесса, влияющие на усталостное изнашивание; адсорбционное понижение прочности (эффект Ребиндера), снижающее износостойкость, и уменьшение коэффициента трения, повышающее износостойкость за счет снижения действующих нагрузок. В результате СМ может как повышать (наиболее частый случай), так и понижать износостойкость.

При возникновении переменных напряжений на КПК и НПК усталостное изнашивание проявляется в виде отслаивания и выкрашивания. При отслаивании трещины, приводящие к отделению материала, зарождаются в глубине, а при выкрашивании – по поверхности трущихся тел.

Методы снижения усталостного изнашивания:

1. Применение смазочных материалов (с учетом вышесказанного).
2. Повышение твердости и пластичности материалов.
3. Снижение нагрузки.

### **6.3. Изнашивание при заедании**

Изнашивание при заедании – это изнашивание в результате схватывания, глубинного выражения материала, переноса его с одной поверхности на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность.

Заедание – процесс возникновения и развития повреждений поверхности трения вследствие схватывания и переноса материала.

Задир – повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения. Обычно рассматривается как крайняя стадия заедания.

Схватывание при трении – явление местного соединения двух твердых тел, происходящего вследствие действия молекулярных сил при трении.

Перенос материала – явление при трении твердых тел, состоящее в том, что материал одного тела соединяется с другим и, отрываясь от первого, остается на поверхности другого.

Изнашивание при заедании приводит к аварийным видам разрушения поверхностей. Причинами заедания обычно считаются:

- при трении без СМ: высокие фактические давления, приводящие к чрезмерному внедрению микронеровностей и разрушению защитных пленок, например, окисных. Повышению температуры и скорости способствует заеданию за счет снижения твердости и прочности материалов.
- При трении со СМ: разрушение граничных смазочных слоев при температурных выше критических или относительная толщина смазочной пленки ниже допустимой.

Способы борьбы с заеданием:

1. Использование СМ, содержащие ПАВ и химически активные присадки.
2. Снижение нагрузки (фактического давления).
3. Снижение скорости (температуры).
4. Подбор СМ с оптимальной вязкостью.

#### **6.4. Эрозионное изнашивание**

Эрозионное изнашивание – механическое изнашивание в результате воздействия высокоскоростного потока жидкости, газа или пара. Разрушение металлов под действием электрических зарядов также относится к эрозии.

Эрозию подразделяют на газовую, кавитационную, абразивную и электрическую. Могут быть сочетания отдельных видов.

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара складывается из трения сплошного потока и его ударов о поверхность. В результате трения происходит расшатывание и вымывание отдельных объемов материала. Скорость изнашивания в этом случае мала. Большая роль принадлежит динамическому действию потока или струи.

Эрозия весьма часто протекает вместе коррозией.

#### **6.5. Кавитационное изнашивание**

Кавитационное изнашивание – это механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает местное высокое ударное давление или высокую температуру.

Суть кавитационного воздействия заключается в том, что при замыкании до исчезновения парогазовых пузырей у поверхности детали она подвергается

микроскопическим гидроударам, однако их количества и интенсивность настолько велики (в некоторых случаях на 1 см<sup>2</sup> в течение 1 с могут образоваться и разрушиться более 30 миллионов пузырьков), что поверхность металла начинает деформироваться и подвергаться наклепу. Многократно повторяющиеся удары вызывают перенаклеп и разупрочнение материала на отдельных участках, сопровождающиеся возникновением очагов разрушения в виде трещин. Сначала разрушаются менее прочные составляющие, затем – остальные.

Предупредить кавитацию можно, проектируя гидромеханическую систему так, чтобы во всех точках потока давление не опускалась ниже давления парообразования. Возможно также осуществление таких конструкций и режимов работы, при которых захлопывание пузырьков происходит вне поверхности детали, в объеме жидкости (антикавитационные корабельные винты).

## **6.6. Изнашивание при фреттинге**

Изнашивание при фреттинге – механическое изнашивание при колебательном относительном микроперемещении.

## **6.7. Окислительное изнашивание**

Окислительное изнашивание – коррозионно-механическое изнашивание, при котором основное влияние оказывает химическая реакция материала с кислородом или окислительной окружающей средой.

Этот вид изнашивания происходит в том случае, когда на соприкасающихся поверхностях образуются пленки окислов, которые в процессе трения разрушаются и вновь образуются. Продукты изнашивания состоят из окислов.

Интенсивность изнашивания может быть весьма значительной, но поверхность трения сохраняет малую шероховатость, т. к. пленки химических соединений препятствуют схватыванию поверхностей.

Для окислительного изнашивания необходимо, чтобы промежуток времени между последовательными разрушениями пленки был достаточен для образования пленки относительно большой величины. В случае разрушения окислов высокой твердости изнашивание будет носить характер абразивного.

Методы снижения окислительного изнашивания:

1. Применение СМ.
2. Повышение твердости поверхностей для снижения пластической деформации.
3. Понижение в допускаемых пределах поверхностной температуры за счет снижения температуры окружающей среды, скорости и нагрузки.

Допускаемое снижение температуры определяется необходимой скоростью химических реакций.

## 6.8. Изнашивание при фреттинг-коррозии

Это коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях.

Изнашивание при фреттинг-коррозии проявляется при амплитудах от  $8 \cdot 10^{-7}$  мм до 2,5 мм, при этом скорости скольжения имеют порядок 1 мм/с. При изнашивании затруднен вывод продуктов износа и протекают схватывание, микрорезание, усталостное разрушение, сопровождающееся коррозией.

Внешние проявления:

- натирсы, т. е. участки поверхности трения, отличающиеся по цвету (окрашенные пятна);
- налипание металла;
- вырывы или раковины, часто заполненные порошкообразными продуктами коррозии;
- полосы или канавки локального износа;
- поверхностные микротрещины.

Методы снижения износа при фреттинг-коррозии:

1. Увеличение натяга пресовых посадок.
2. Использование демпфирующих устройств для гашения вибраций.
3. Улучшение подвода СМ.
4. Увеличение диаметра вала.
5. Введение разгрузочных канавок.
6. Применение упругих покрытий (полимеры, резина).
7. Использование бесконтактных уплотнений.
8. Замена трения скольжения на трение качения.
9. Упрочнение поверхностей.

Помимо вошедших в классификацию видов изнашивания рассмотрим еще два, открытых в последнее десятилетие, а именно: водородное изнашивание и изнашивание при избирательном переносе.

## 6.9. Водородное изнашивание

Водородное изнашивание – это изнашивание, приводящее к повышенному износу под влиянием водорода, взаимодействующего с материалами поверхностей трения. (А. А. Поляков, Д. Н. Гаркунов, конец 60-х годов).

Водород выделяется при трибодеструкции материалов пары трения или окружающей среды (СМ, вода, топливо), затем адсорбируется на поверхности, диффундирует вглубь материала, где накапливается и ускоряет изнашивание (водородная хрупкость).

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

Ранее считали, что максимальная температура при трении возникает на поверхности трущейся детали. Но в последние годы теоретически А. В. Кудимов, а затем экспериментально В. Я. Матюшенко установили, что при тяжелых режимах трения максимальная температура образуется не на поверхности детали, а на некоторой глубине. Это создает условия, при которых водород диффундирует вглубь поверхности, там концентрируется и вызывает охрупчивание поверхностных слоев.

Водородное изнашивание присутствует и при трении качения. Действие его заключается в снижении контактной усталости, обусловленном присутствием воды в смазочном материале или топливе. Характерным примером являются тяжело нагруженные подшипники авиационных двигателей.

Методы снижения водородного изнашивания:

1. Выбор материалов наименее подверженных наводороживанию и водородному охрупчиванию: цветные металлы; стали, легированные Cr, Ti, V.
2. Применение СМ, менее подверженных гидрогенизации.
3. Применение медных сплавов с минимальным содержанием Sb, As, S.
4. Снижение температуры, скорости скольжения и нагрузки в узлах трения.
5. Введение в полимерные материалы в качестве наполнителя закиси меди, связывающей водород.
6. Применение обезводораживающих технологических операций при обработке деталей: отжиг, полирование.

### **6.10. Изнашивание при избирательном переносе**

Эффект избирательного переноса поясняет формулировка открытия N 41, зарегистрированного в 1965 году, авторами которого являются И. В. Крагельский и Д. И. Гаркунов:

«Обнаружено, что при трении медных сплавов о сталь в условиях граничной смазки, исключаяющей окисление меди, происходит явление избирательного переноса меди из твердого раствора медного сплава на сталь, сопровождающееся уменьшением коэффициента трения до жидкостного и приводящее к значительному снижению износа пары трения».

Существенное снижение интенсивности изнашивания за счет избирательного переноса (в несколько раз) получило название эффект безизносности.

Из определения следует вывод, что трение и изнашивание при избирательном переносе происходит при наличии дополнительной, по сравнению с обычными условиями, разделительной пленки. Эта пленка, обычно медная, называется сервовитной – «спасающей жизнь».

Факторы, вызывающие безизносность:

1. Контактное повреждение поверхностей происходит через мягкий слой металла, (меди), при этом основной металл испытывает пониженные (~ в 10 раз) давления за счет увеличения ФПК.
2. Металлическая пленка в процессе деформации не упрочняется и может многократно деформироваться без разрушения.
3. Трение происходит без окисления поверхности, эффект Ребиндера реализуется в большой степени в тонком поверхностном слое.
4. Продукты изнашивания переходят с одной поверхности на другую и обратно, удерживаясь в зоне трения электрическими силами.
5. На поверхности сервоитной пленки образуются продукты полимеризации смазочного материала.
6. Сервоитная пленка защищает сталь от проникновения водорода и за счет снижения нагрузок практически исключает выделение водорода из СМ. Эффект безизносности реализован:
  - в парах трения сталь-медный сплав, или композиция на основе меди, при смазывании глицерином, минеральными маслами, нефтью и т. п.
  - в парах трения сталь-сталь, сталь-чугун при смазывании СМ, содержащим медный порошок (металлоплакирующие СМ).
  - в парах трения сталь-фторопласт, наполненный бронзой, в т. ч. без СМ.

### **6.11. Дополнительные замечания**

После рассмотрения отдельных видов изнашивания необходимо сделать несколько замечаний:

1. На поверхностях трения обычно реализуется несколько видов изнашивания, один из которых является доминирующим.
2. Данный вид изнашивания реализуется с постоянной интенсивностью только при постоянном режиме работы (скорость - нагрузка - температура – рабочая и окружающая среда) и постоянных условиях в контакте, определяемых свойствами и составом поверхностных слоев и продуктов изнашивания.
3. При изменении режима работы или условий в контакте либо происходит изменение вида изнашивания (т. н. критические точки), либо интенсивности изнашивания.
4. При трении деталей после технологической обработки или после изменения режима работы протекает процесс изменения свойств поверхностных слоев, называемый приработкой. Приработка обычно проявляется в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

## 7. СМАЗКА И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Смазочные материалы (СМ) являются конструкционным элементом узлов трения, определяющим долговечность, надежность и потери на трение в трибонапряжениях.

### Классификация СМ

I – физическое состояние (газообразный, жидкий, пластичный, твердый);

II – наличие присадки (без присадок (базовое масло), с присадками).

**Газообразные СМ (ГСМ)** – это продукт, в качестве которого выступают воздух, некоторые инертные газы, водяной пар и другие газообразные вещества.

Газовые смазочные материалы используются в высокоскоростных узлах трения при  $n > 10000$  об/мин.

**Жидкие СМ (ЖСМ)** – это продукт, представляющий собой основу (масло) и присадки, которые придают СМ те или иные эксплуатационные свойства (антифрикционные, противоизносные, противозадирные, моющие, защитные и иные свойства).

**Пластичный СМ (ПСМ)** – это полутвердый или твердый продукт, состоящий из смеси минерального или синтетического масла, стабилизированного мылами или другими загустителями с возможным содержанием других компонентов.

**Твердые СМ (ТСМ)** – это продукт органического или неорганического происхождения, обладающий меньшим сопротивлением сдвигу, чем материалы трущихся тел (графит, полимеры, мягкие металлы, дисульфид молибдена и др). Применяются там, где исключают возможность применения СМ других видов.

ТСМ и твердые антифрикционные покрытия применяются тогда, когда не могут применяться ЖСМ и ПСМ, т. е. при температурах застывания этих материалов и при высоких температурах, когда эти материалы разлагаются и испаряются.

Из неорганических твердых смазочных материалов наиболее широкое распространение получили: графит, дисульфид молибдена  $MoS_2$ , дисульфид вольфрама  $WS_2$ .

Из органических ТСМ наиболее широко используются политетрафторэтилен (ПТФЭ), полиамиды.

**Присадка к СМ** – вещество, добавляемое к СМ для придания ему новых свойств или усиления существующих.

### Виды смазки

I – по физическому состоянию: -газовая; -жидкостная; -твердая.

II – по типу разделения поверхностей трения СМ: -гидродинамическая; -гидростатическая; -газодинамическая; -газостатическая; -эластогидродинамическая; -граничная; -полужидкостная (смешанная).

**Гидродинамическая смазка (гидродинамическая)** – жидкостная (газовая) смазка, при которой полное разделение поверхностей трения

осуществляется в результате давления, самовозникающего в слое жидкости (газа) при относительном движении поверхностей.

**Гидростатическая (газостатическая) смазка** – жидкостная (газовая) смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате подачи жидкости (газа) в зазор между ними под специально создаваемым внешним давлением.

**Эластогидродинамическая смазка** – смазка, при которой трение и износ между поверхностями, находящимися в относительном движении, определяется свойствами СМ, отличными от объемных.

**Полужидкостная (смешанная) смазка** – смазка, при которой частично осуществляется гидродинамическая смазка.

### 7.1. Трение со смазочным материалом

**Трение со смазочным материалом** – это трение двух тел при наличии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида.

В соответствии с приведенными видами смазки различают **виды трения с СМ**: трение при гидродинамической смазке и т. д.

Кроме типа разделения поверхностей виды трения со СМ различаются величиной, называемой **относительной толщиной смазочной пленки  $\lambda$** , т. е. отношением:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}},$$

где  $h$  – наименьшая толщина смазочного слоя – наименьшее расстояние между вершинами микронеровностей соприкасающихся поверхностей (рис. 12).

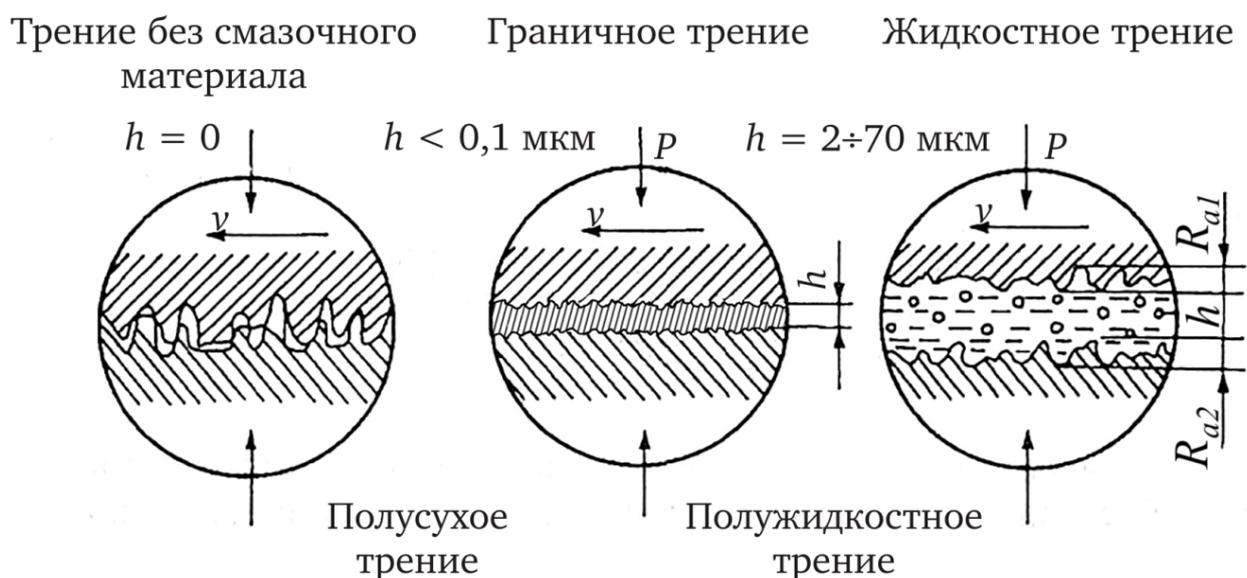


Рисунок 12 – Виды трения со смазочным материалом

## 7.2. Трение при граничной смазке

В результате **адсорбции** из жидкой или газообразной внешней среды на поверхности твердых тел образуются **граничные слои**, препятствующие их непосредственному контакту. Наиболее прочные адсорбционные слои на металлах образуют ПАВ, входящие в состав СМ, такие как жирные кислоты, их спирты и эфиры, животные и растительные жиры, а также амины, амиды и их производные.

При образовании адсорбционный слой в результате воздействия поверхности приобретает упругость формы, переходя в квазитвердое или квазикристаллическое состояние. Такие слои могут выдерживать давление до 1000 МПа.

Молекулы смазочного материала ориентируются перпендикулярно к твердой поверхности и образуют **граничную пленку**, которую можно представить для наглядности в виде «ворса». Благодаря подвижности молекул смазочного материала на поверхности трения адсорбция протекает с большой скоростью, что придает смазочной пленке свойство **«залечиваться»** при местных повреждениях. Это свойство играет большую роль в предупреждении лавинного процесса схватывания.

При трении покоя роль граничных смазочных слоев в основном сводится к уменьшению коэффициента сцепления (обычно в 2...3 раза) за счет уменьшения молекулярной составляющей.

Трение скольжения при граничной смазке нельзя сводить только к контактированию молекул СМ, т. к. в результате нагрева и интенсивной пластической деформации поверхностные слои металла и СМ становятся более активными и, взаимодействуя между собой, а также внешней средой, изменяются – модифицируются.

Значения коэффициента трения зависят от сочетания свойств материалов пары трения и СМ и обычно лежат в диапазоне 0,1... 0,15. Трение при граничной смазке реализуется при значениях относительной толщины смазочной пленки  $\lambda < 1$ .

Трение при граничной смазке может иметь место в узлах при использовании СМ любого вида: газообразного, жидкого, пластинчатого и твердого, хотя в первом и последнем случае механизм образования граничных слоев отличается от описанного выше.

## 7.3. Трение при гидродинамической смазке

**Гидродинамическая смазка** обычно имеет место в узлах трения скольжения, например, в жидкостных подшипниках скольжения, и в очень редких случаях – в узлах трения качения (легкозагруженные подшипники качения).

При гидродинамической смазке поверхности трения полностью разделены слоем СМ, а избыточное давление на нем появляется в результате

относительного движения. Необходимым условием создания смазочной пленки является наличие сужающегося **клинового зазора**.

Для осуществления гидродинамической смазки необходимо, чтобы наименьшая толщина смазочного слоя при гладких поверхностях и прочих идеальных условиях была не менее толщины, при которой проявляются объемные свойства жидкости (вязкость). Для шероховатых поверхностей относительная толщина смазочного слоя должна быть не менее:  $\lambda > 5$ . Толщина смазочного слоя обычно находится в пределах 10...100 мкм.

Избыточное давление, возникающее в слое СМ, в рассматриваемом случае не столь велико, чтобы вызывать заметные деформации деталей или существенно изменить вязкость СМ, что учитывается в расчетах.

Трение при гидродинамической смазке не зависит от материалов пар трения и является наиболее предпочтительным, обеспечивающим наименьшее значение коэффициента трения (0,001-0,005).

#### **7.4. Трение при эластогидродинамической смазке**

**Эластогидродинамическая смазка** в основном реализуется в узлах трения с большой разностью радиусов кривизны сопрягаемых деталей – наружное касание цилиндров. Это могут быть узлы как трения качения (шариковые и роликовые подшипники) и скольжения. В этом случае полное разделение поверхностей трение наступает при относительной толщине смазочного слоя  $\lambda > 3...4$ . Толщина смазочного слоя обычно составляет 0,1... 1 мкм.

В парах трения такого рода давление, возникающие в слое СМ, очень велико (до 5000 МПа), в результате чего на несколько порядков возрастает вязкость СМ и происходит деформация сопряженных поверхностей. Это сильно усложняет математическое описание.

Значение коэффициента трения из-за возрастания вязкости выше, чем при гидродинамической смазке, и достигает 0,1... 0,12.

Трение при эластогидродинамической смазке может осуществляться и в подшипниках скольжения, если модуль упругости материала втулки менее 800 ГПа (в 2,5 раза меньше, чем у стали). В этом случае глубина поверхностей сопряженных поверхностей соизмеримо с толщиной промежуточного слоя вязкой жидкости.

Несмотря на относительно высокие значения коэффициента трения, данный вид смазки также является предпочтительным.

#### **7.5. Трение при смешанной смазке**

**Смешанная смазка** представляет собой совокупность граничной, гидродинамической и эластогидродинамической смазки, имеющейся на различных участках соприкасающихся поверхностей.

Для узлов с гидродинамической смазкой трение возникает при  $\lambda < 5$ , с эластогидродинамической – при  $\lambda < 1,2...3$  (в зависимости от конструкции узла). По сравнению с граничной смешанная смазка является предпочтительной, т. к. обеспечивает обычно меньшие значения коэффициента трения.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Что такое изнашивание?
2. Перечислить основные процессы, которые обуславливают водородное изнашивание?
3. От каких факторов зависит степень наводороживания?
4. В каком году была опубликована первая работа влияния водорода на охрупчивание стали?
5. Какие выводы сделал П. Коттерил по влиянию водорода на объемную прочность стали?
6. На сколько групп можно разделить теорию водородного охрупчивания?
7. С какими процессами связано водородное изнашивание?
8. Что является последним этапом водородного изнашивания?
9. Сколько существует видов водородного изнашивания?
10. Какую температуру в начале имеет пластичный смазочный материал 1-13?
11. При какой температуре протекает активное термическое разрушение древесины?
12. Описать процессы изнашивания металлов в среде газообразного водорода.
13. При какой температуре в зоне резания при использовании инструментов из быстрорежущей стали водород вызывает как изнашивание режущего инструмента, так и охрупчивание обрабатываемого материала?
14. Найти меры борьбы с водородным изнашиванием.
15. В чем сущность определения коксуемости?

## ТЕСТЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ ПО ТРИБОЛОГИИ И ТРИБОТЕХНИКИ

1. Какие процессы лежат в основе трения и износа?

Выберите один ответ:

- взаимосвязь между веществами;
- **молекулярное взаимодействие;**
- процесс изнашивания;
- связь между атомами.

2. Какие существуют механизмы разрушения?

Выберите один ответ:

- **механические, молекулярно-механические, коррозионо-механические;**
- молекулярное, химические;
- тепловые, потенциальные;
- физические, химические, физико-химические.

3. Во сколько раз снижается усталостная прочность деталей при фреттинг-коррозии?

Выберите один ответ:

- **3-6;**
- 20-30;
- 1-15;
- 1-2.

4. Какими процессами определяется износостойкость?

Выберите один ответ:

- механическими процессами;
- **давлением, температурой;**
- магнитным полем;
- концентрацией трущихся тел.

5. Выберите 3 фактора, от которых зависит коэффициент трения скольжения:

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{N}$$

Выберите один или несколько ответов:

- **род и температура смазки;**
- **качество обработки трущихся поверхностей;**
- **материал трущихся тел;**
- площадь трущихся тел;
- температура трущихся тел.

6. Для чего нужно знать механизм деформации и разрушения? – Для того чтобы...

Выберите один или несколько ответов:

- **создавать прочные и долговечные материалы;**
- **создавать материалы с заданными механическими, магнитными и др. свойствами;**
- **изменять свойства тел в нужном направлении;**
- имитировать свойства тел, существующие в природе.

7. Назовите причину пластичности твердых тел:

Выберите один ответ:

- Наличие вакансий;
- Наличие микротрещин;
- Движение дислокаций;
- **Все перечисленные причины.**

8. Что является следствием упорядоченного строения кристалла?

Выберите один или несколько ответов:

- **правильная внешняя форма;**
- **зависимость физических свойств от направления;**
- физические свойства по всем направлениям одинаковы;
- упругая форма.

9. Для какого из этих видов трения сила трения никогда не обращается в нуль, даже если относительная скорость тел равна нулю?

Выберите один ответ:

- **сухое трение;**
- вязкое трение.

10. Какой вид трения является характерной особенностью сухого трения?

Выберите один ответ:

- Трение скольжения;
- Трение качения;
- **Трение покоя.**

11. Все аморфные тела – изотропны.

Выберите один ответ:

- **Верно;**
- Неверно.

12. Все монокристаллы – анизотропны.

Выберите один ответ:

- **Верно;**
- Неверно.

13. Верно или неверно следующее утверждение:

*Чистота и качество обработки соприкасающихся поверхностей не влияют на силы трения.*

Выберите один ответ:

- Верно;
- **Неверно.**

14. Между идеально гладкими телами присутствуют силы трения

Выберите один ответ:

- **Верно;**
- Неверно.

15. Стеклование и размягчение аморфных тел не происходят при какой-то определенной температуре плавления.

Выберите один ответ:

- **Верно;**
- Неверно.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бородавко, В. И. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко. – Минск: Белорусская наука, 2013. – 464 с. – Текст: непосредственный.

2. Гура, Г. С. Механика и трибология движения колесной пары в рельсовой колее: монография / Г. С. Гура. – М.: учеб.-метод. центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 528 с. – Текст: непосредственный.

3. Грицук, И. В. Методические указания к выполнению лабораторных работ по определению качества автомобильных топлив и смазочных материалов / И. В. Грицук. – Макеевка: ДонГАСА, 2003. – 64 с. – Текст: непосредственный.

4. Мышкин, Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с. – Текст: непосредственный.

5. Пенкин, Н. С. Основы трибологии и триботехники : учеб. пособие / Н. С. Пенкин. – М.: Машиностроение, 2012. – 208 с. – Текст: непосредственный.

6. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В. Л. Попов. – М.: Физматлит, 2013. – 352 с. – Текст: непосредственный.

7. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин : научное издание / А. С. Проников. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 559 с. – Текст: непосредственный.

8. Сорокин, Г. М. Основы механического изнашивания сталей и сплавов: учеб. пособие / Г. М. Сорокин, В. Н. Малышев. – М.: Логос, 2014. – 308 с. – Текст: непосредственный.

Учебное издание

**Фёдорова Олеся Вячеславовна  
Марков Виктор Александрович**

**Основы трибологии  
и триботехники в оборудовании  
целлюлозно-бумажного производства**

**Контактное взаимодействие твердых тел  
в технологических комплексах лесной  
и целлюлозно-бумажной промышленности**

*Учебное пособие*

Редактор и корректор А. А. Чернышева  
Техн. редактор А. А. Чернышева

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:  
электронное устройство с программным обеспечением  
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: [http://publish.sutd.ru/tp\\_get\\_file.php?id=202016](http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016), по паролю.  
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 17.09.2024 г. Рег. № 5335/24

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД  
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.