

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Майкопский государственный технологический университет»

Кафедра технологии, машин и оборудования пищевых производств

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ
ДИСЦИПЛИН
«ИЗНОС И РАЗРУШЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ»,
«ИЗНОС И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»
ДЛЯ БАКАЛАВРОВ ОЧНОЙ И ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ
ПО НАПРАВЛЕНИЯМ ПОДГОТОВКИ
15.03.02 «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ»
35.03.06 «АГРОИНЖЕНЕРИЯ»**

Майкоп, 2019

УДК 621.81.004.62/63(07)

ББК 34.41

М 54

Печатается по решению научно-методического совета технологического факультета
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Майкопский государственный технологический университет»

Составители:

Сиюхова Белла Батмизовна - старший преподаватель кафедры технологии, машин и
оборудования пищевых производств ФГБОУ ВО «Майкопский государственный
технологический университет».

Хачатуров Владимир Николаевич – кандидат педагогических наук, доцент кафедры
технологии, машин и оборудования пищевых производств ФГБОУ ВО «Майкопский
государственный технологический университет».

Рецензент:

Сиюхов Хазрет Русланович - доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
технологии, машин и оборудования пищевых производств ФГБОУ ВО «Майкопский
государственный технологический университет».

Методические указания по изучению дисциплин: «Износ и разрушение деталей», «Износ
и разрушение материалов» для бакалавров очной и заочной формы обучения по
направлениям подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»,
35.03.06 «Агроинженерия» - Майкоп, 2019. – 30 с.

Методические указания по изучению дисциплин: «Износ и разрушение деталей», «Износ
и разрушение материалов» для бакалавров очной и заочной формы обучения по
направлениям подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»,
35.03.06 «Агроинженерия»

Методические указания ориентированы на расширение профессиональных знаний и
конкретных навыков в области технологии машин и оборудования, могут в дальнейшем
использоваться в ходе выполнения Выпускной квалификационной работы.

ФГБОУ ВО «МГТУ», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Изнашивание твёрдых тел при фрикционном контакте	5
2. Механизмы разрушения и виды изнашивания твёрдых тел	14
3. Механические виды изнашивания	15
4. Молекулярно-механические виды изнашивания	22
5. Коррозионно-механические виды изнашивания	24
6. Стадии изнашивания трущихся тел	26
Список использованных источников	30

ВВЕДЕНИЕ

Изнашивание деталей машин является следствием процессов трения возникающих в узлах и деталях в процессе работы. Данные процессы являются основной причиной выхода из строя огромного количества машин и оборудования.

Целями и задачами освоения учебного курса «Износ и разрушение деталей» является получение профессиональных знаний по данному курсу.

При изучении данной дисциплины будут рассмотрены общие положения об изнашивании твёрдых тел при фрикционном контакте, а также особенности и характерные признаки проявления различных механизмов и видов изнашивания в зоне трения поверхностей твёрдых тел.

Обучающиеся познакомятся с теоретическими и практическими аспектами износа деталей и смогут получить базовые навыки в оценке механизмов и видов изнашивания.

1. ИЗНАШИВАНИЕ ТВЁРДЫХ ТЕЛ ПРИ ФРИКЦИОННОМ КОНТАКТЕ

Изнашивание – это процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхностей трения материала и (или) образовании на поверхностях трения остаточной деформации (ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка»).

Результат процесса изнашивания и связанные с ним изменения геометрических параметров контактирующих при трении поверхностей, получил название **износ** (рис. 1).

Изнашивание – достаточно сложное явление, включающее большое разнообразие механизмов, которые далеко не всегда действуют отдельно и независимо. Тем не менее, довольно часто существует ведущий механизм, ответственный за вид и интенсивность изнашивания. Изнашивание зависит от большого числа факторов, включая нагрузку, скорость скольжения, температуру, свойства трущихся материалов, смазку, параметры окружающей среды и т.д.

Количество материала, удаленного с поверхности трения, измеряется в единицах длины (например, толщина изношенного слоя Δh), объема ΔV или массы ΔM , и в этих случаях износ называется линейным, объемным или массовым соответственно. Величина износа, отнесенная к единице пути трения, называется интенсивностью изнашивания. В случае линейного износа интенсивность изнашивания является безразмерной величиной.

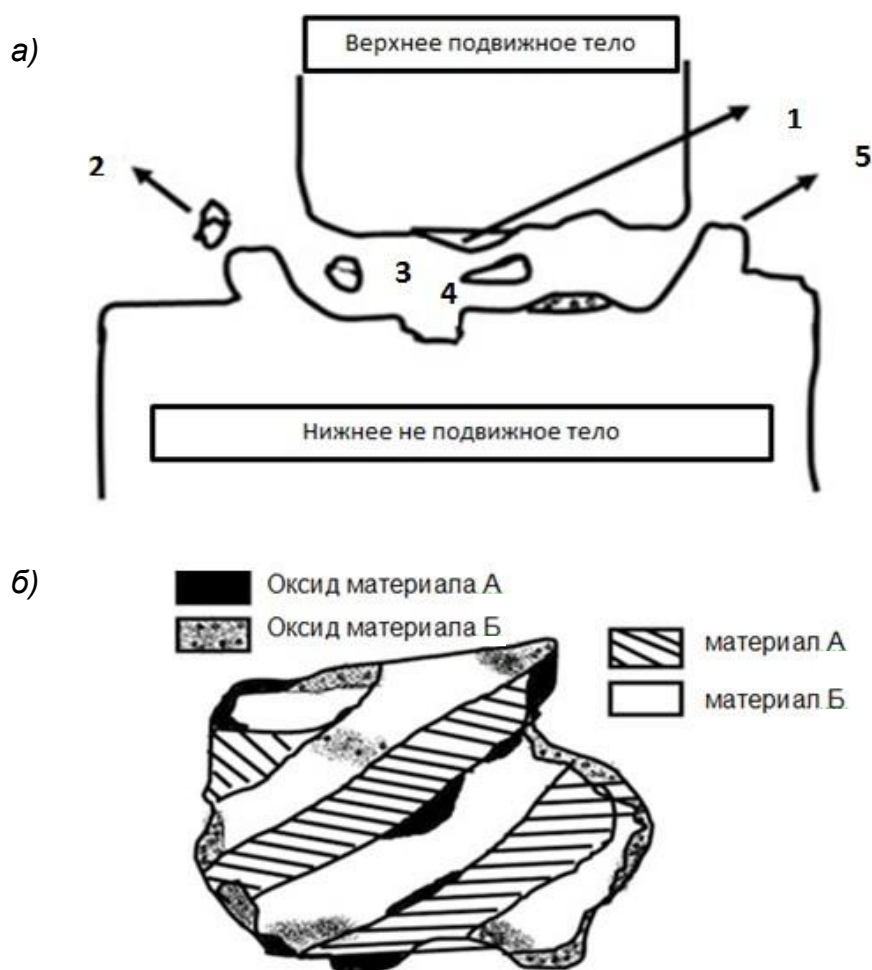


Рис. 1. Упрощённая схема модели износа: а – модель износа, б – модель частицы износа:
 1 – адгезия частиц нижнего неподвижного тела на верхнем подвижном теле,
 2 – частица износа покрытая оксидной пленкой
 после контакта с кислородом, 3 – третье тело в зоне контакта, 4 – деформация третьим телом более
 мягкого материала, 5 – объемная пластическая деформация в зоне контакта

Величину износа ΔI определяют по связанным между собой соотношениям:

$$h = \frac{\Delta V}{A_a} = \frac{\Delta M}{\rho^* A_a},$$

где A_a – номинальная площадь поверхности трения; ρ – плотность изнашиваемого материала.

Общепризнанно, что износ возрастает с нагрузкой и длительностью процесса трения. Чем тверже трущийся материал, тем меньше износ и т.д. Но даже эти почти очевидные закономерности имеют свои исключения.

Модель износа основывается на допущении, что контакт двух шероховатых поверхностей дискретен, т.е. состоит из отдельных пятен контакта, сформированных неровностями сопряженных поверхностей. При этом площадь отдельного пятна вначале возрастает от нуля до своего максимального значения πa^2 (здесь a – наибольший радиус пятна контакта), а затем убывает до нуля. Один из этапов этого процесса показан на рис. 2. На этих пятнах возникают адгезионные связи (мостики сварки), разрушение которых и составляет сущность рассматриваемого процесса изнашивания. Кроме того, предполагается, что локальная деформация неровностей носит характер пластического течения. Очевидно, что в такой ситуации нормальная нагрузка P_n , воспринимаемая пятном контакта, определяется выражением:

$$P_n = \pi a^2 p_t, \quad (1.1)$$

где p_t – давление текучести пластически деформированной неровности, которое близко к твердости материала H .

В процессе скольжения происходит непрерывное формирование и разрушение адгезионных связей. При этом может происходить отделение частиц материала неровностей. Объем каждого такого фрагмента (частицы износа) зависит от характерного размера адгезионной связи, его породившей. Пусть объем частицы износа V_n пропорционален кубу контактного радиуса a . Это предположение подразумевает, что форма частицы износа не зависит от ее размера, и мы можем рассматривать частицу износа как полусферу радиуса a с объемом

$$V_n = \frac{2\pi a^3}{3}. \quad (1.2)$$

Наиболее распространённой характеристикой процесса изнашивания является **интенсивность изнашивания**, представляющая отношение износа ΔI к пути ΔS , на котором происходило изнашивание, или к объёму работы ΔA , при выполнении которой накоплен износ

$$I = \frac{\Delta I}{\Delta S}$$

Частица износа образуется на пути трения $2a$ (рис. 3), тогда интенсивность изнашивания I (износ, отнесенный к единичному пути трения) равна $V_n/(2a)$, т.е. $I = (\pi a^2)/3$. Переписав равенство (1.2) с учетом (1.1), получаем

$$I = \frac{P_n}{3\rho_T}.$$

Если бы все пары взаимодействующих неровностей генерировали частицы износа, то общая интенсивность изнашивания равнялась бы сумме вкладов от всех пятен контакта:

$$I = \frac{P}{3\rho_T},$$

где общая нормальная нагрузка на контакте $P = \Sigma P_n$.

Вполне резонно считать, что частицы износа появляются не на всех пятнах контакта, а лишь на некоторой части их, скажем k . Заметим, что коэффициент k может также учитывать геометрическое подобие частицы износа и области деформирования пятен контакта. Следовательно

$$I = \frac{kP}{3\rho_T}.$$

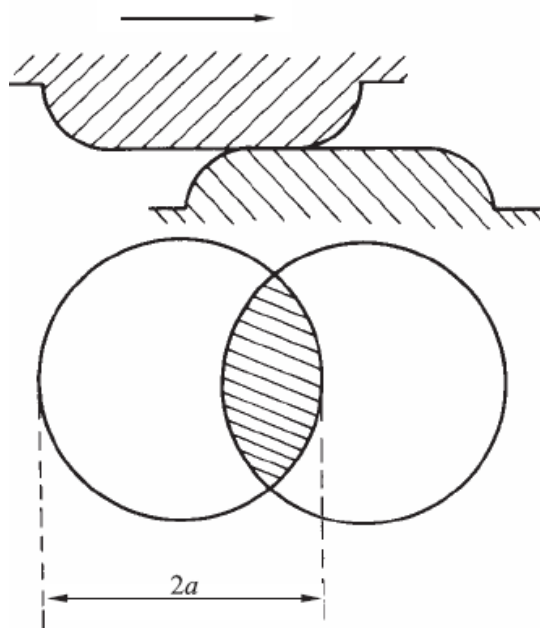


Рис. 3. Упрощенная схема формирования единичного пятна контакта

Удобно обозначить $K = k/3$ и предположить, что $p_T = H$ (твердость материала), тогда уравнение изнашивания запишется в виде

$$I = \frac{KP}{H}. \quad (1.3)$$

Это уравнение изнашивания, часто называемое уравнением Арчарда, показывает, что интенсивность изнашивания I прямо пропорциональна нормальной нагрузке P и обратно пропорциональна твердости более мягкого материала H . Константа K , обычно называемая коэффициентом износа, безразмерна и всегда меньше единицы. Коэффициент износа K позволяет сравнивать интенсивности протекания процессов изнашивания в различных узлах трения. Для инженерных приложений часто оказывается предпочтительнее использовать отношение K/H , названное размерным **коэффициентом износа**, его размерность $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$. Оценка износа с помощью такого коэффициента особенно полезна при сравнении интенсивностей изнашивания материалов разных классов.

Интересно отметить, что уравнение Арчарда легко получается с помощью анализа размерностей. Изношенный объем, отнесенный к пути скольжения, имеет размерность площади, а отношение P/H есть фактическая площадь контакта при пластическом деформировании неровностей. Единственная безразмерная величина (коэффициент износа) получается как отношение этих двух площадей. Из уравнения Арчарда следует, что если K есть константа для данного сопряжения, то объем (или масса) изношенного материала должен быть пропорционален пути трения. Если же нормальная нагрузка P изменяется, то пропорционально должна измениться интенсивность изнашивания.

Громадное число исследований подтверждает, что износ многих узлов трения действительно пропорционален пути скольжения. Исключения могут наблюдаться в начале скольжения (при приработке), когда интенсивность изнашивания может быть выше или ниже своего установившегося значения в зависимости от характера процесса при-работки. Что касается прямой пропорциональности интенсивности изнашивания

нормальной нагрузке, то для многих систем она наблюдается лишь в ограниченном диапазоне нагрузок. Более того, с увеличением нагрузки интенсивность изнашивания может резко возрасти и затем вновь снизиться.

Хотя коэффициент износа K играет большую роль при исследовании и анализе трибосистем, его физический смысл не совсем ясен, а его значения могут быть определены лишь экспериментально. Коэффициент износа K изменяется в широком диапазоне, охватывающем около шести порядков, в зависимости от свойств материалов и режимов трения. Некоторые типичные значения коэффициента износа представлены на рис. 4 для ряда материалов. Следует иметь в виду, что уравнение изнашивания Арчарда справедливо лишь при таких условиях, когда механизм изнашивания остается неизменным. Небольшие изменения в условиях эксплуатации могут привести к изменению этого механизма, и тогда, по крайней мере, коэффициент износа должен измениться. Следовательно, этот коэффициент оставляет большой простор для самых разных интерпретаций, и уравнения износа, подобные уравнению Арчарда, могут быть выведены на основе других предпосылок, что часто и делается.

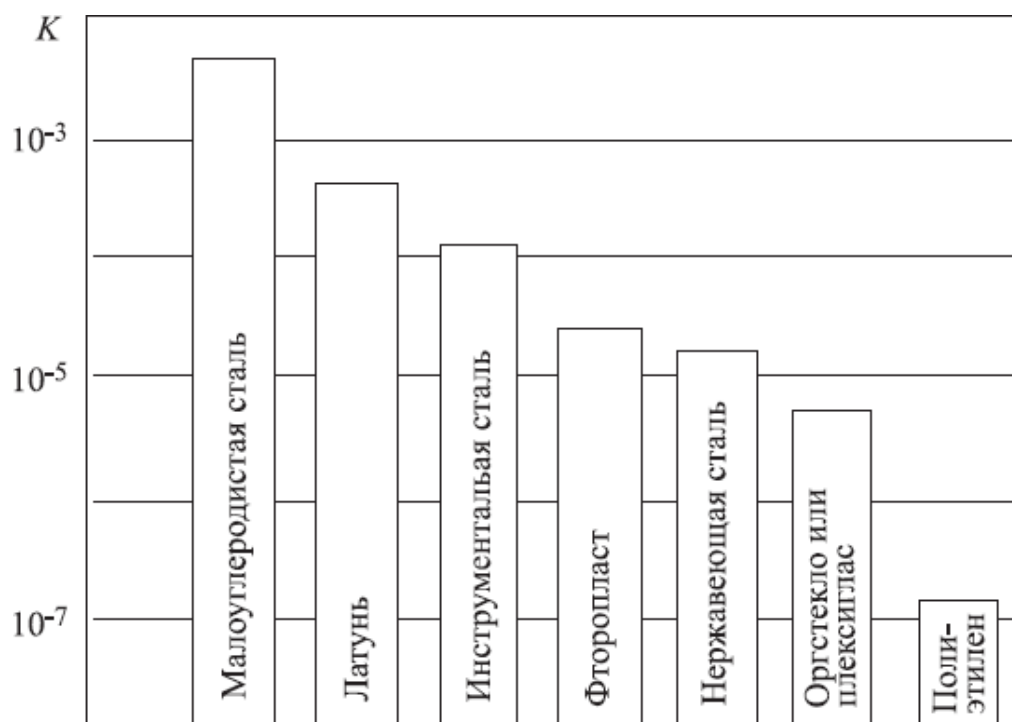


Рис. 3. Значения безразмерного коэффициента износа K для разных материалов, трущихся по малоуглеродистой стали, на пальчиковой машине трения без смазки

Процесс изнашивания характеризуется также скоростью изнашивания V_n , представляющей собой отношение износа $\Delta И$ к интервалу времени Δt , за которое он наработан

$$V_n = \frac{\Delta И}{\Delta t}.$$

Величина, обратная интенсивности изнашивания, получила название **износостойкость**. Износостойкость характеризует способность пары трения сопротивляться процессу изнашивания.

Износостойкость в настоящее время стала одним из нормативных, комплексных и наиболее универсальных триботехнических показателей узла трения. Значения износостойкости на практике колеблются пределах от 10^3 до 10^{13} . Поэтому её часто представляют в виде некоторой логарифмической шкалы.

Весь диапазон шкалы износостойкости фрикционных пар разделяется на классы и разряды. Для их определения используется показательная или аналогичная логарифмическая зависимость

$$J = \alpha_k \cdot 10^k,$$

где α_k - мантисса логарифма $0 \leq \lg(\alpha_k) \leq 1$ ($1 \leq \alpha_k \leq 10$); k – целое число, обозначающее номер класса износостойкости.

Устанавливаются десять классов износостойкости – от 3-го до 12-го класса включительно (табл. 1). Нижняя граница J в каждом классе не входит в его состав.

Таблица 1

Классы износостойкости

Класс износостойкости	Износостойкость	Класс износостойкости	Износостойкость
3	$10^3 \dots 10^4$	8	$10^8 \dots 10^9$
4	$10^4 \dots 10^5$	9	$10^9 \dots 10^{10}$
5	$10^5 \dots 10^6$	10	$10^{10} \dots 10^{11}$
6	$10^6 \dots 10^7$	11	$10^{11} \dots 10^{12}$
7	$10^7 \dots 10^8$	12	$10^{12} \dots 10^{13}$

В качестве примера можно привести классы износостойкости, которые рекомендуются для некоторых типовых узлов трения (табл. 2).

Таблица 2

Класс износостойкости типовых узлов трения

Узел трения	Класс износостойкости
Цилиндропоршневая группа автомобиля	11, 12
Цилиндропоршневая группа компрессора	10
Направляющая токарного станка	9, 10
Дисковый тормоз	6...10
Подшипники скольжения	6...8
Резцы	8

По характеру проявления и действия трение и износ представляют собой параметры, которые легко обнаружить и измерить. На первый взгляд, они представляют собой механический процесс. Однако более глубокое изучение процессов трения и износа показало, что в их основе лежат также и сложные физико-химические процессы, обусловленные молекулярными взаимодействиями.

И если износ пары трения может быть следствием только непосредственного взаимодействия трущихся тел, то сила трения действует как при непосредственном контакте поверхностей, так и в случае, когда трущиеся поверхности разделены третьим жидким или газообразным телом.

Износ зависит от следующих основных факторов, действующих на узел трения:

- 1) давления на поверхности трения P_a и скорости относительного скольжения $V_{ск}$;
- 2) параметров, характеризующих состав, структуру и механические свойства материалов пары трения (твёрдость, предел текучести, модуль упругости и др.);
- 3) свойств поверхностного слоя, его шероховатости, состава, жёсткости, напряженного состояния и т.д.;
- 4) вида трения и свойств смазки;
- 5) внешних условий, влияющих на процесс изнашивания (температуры, наложения вибраций, влажности и др.);
- 6) конструктивных особенностей фрикционного узла.

Значения этих показателей могут меняться во времени, т.е. в процессе работы узла трения. Поэтому точная констатация этих показателей представляет собой исключительно сложную задачу, решение которой в настоящее время находится ещё в стадии становления. В связи с этим И.В. Крагельский предложил рассматривать фрикционный процесс как систему входных параметров, которыми мы можем задаваться; внутренних факторов, проявляющихся при непосредственном взаимодействии трущихся тел (и которые весьма сложно контролировать во время реализации фрикционного процесса) и выходных параметров, фиксируемых в результате происшедшего фрикционного контакта (табл. 3).

Таблица 3

Факторы и параметры процессов трения и износа

Входные параметры	Внутренние факторы	Выходные параметры
1. Природа контактирующих тел 2. Промежуточная среда 3. Нагрузка 4. Скорость 5. Температура	1. Изменение шероховатости 2. Пластическая деформация поверхностного слоя 3. Накопление вакансий дислокаций 4. Изменение структуры поверхностного слоя 5. Изменение механических свойств 6. Тепловыделение при трении 7. Изменение свойств пленок 8. Химическое взаимодействие зоны трения с окружающей средой 9. Трибомутация	1. Сила трения 2. Интенсивность износа

При кажущейся общности между процессами трения и износа каждое из этих явлений имеет свою специфическую природу. Более сложную природу взаимодействия проявляет механизм изнашивания твёрдых тел.

2. МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ И ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Фрикционный контакт узла трения любой машины имеет неоднородность распределения сжимающих и растягивающих усилий, разные скорости относительного скольжения и контакт с окружающей средой (газами, дымами, парами, смазочными материалами и т.п.). Под действием сил выделяется тепло, образуются области с высокими градиентами температур и напряжений, материал деформируется, осуществляется движение дефектов и дислокаций, создаются благоприятные условия для протекания физических, химических и физико-химических процессов (электризация, диффузные, окислительные, восстановительные и сорбционные процессы), а также связанные с ними явления. В реальном фрикционном контакте, как правило, одновременно протекают все эти процессы. Однако среди них для конкретных условий можно выделить наиболее характерный процесс, а в связи с этим охарактеризовать характерный для него механизм разрушения и вид изнашивания.

Принято различать следующие механизмы разрушения:

- 1) **механический**, в основе которого рассматривается действие только механических сил;
- 2) **молекулярно-механический**, в основе которого действуют силы физической природы;
- 3) **коррозионно-механический**, в основе которого действуют силы химической и электрохимической природы.

Каждому из этих механизмов соответствуют и характерные для них виды изнашивания. Поэтому в зависимости от механизмов разрушения разделяют износ деталей машин на виды изнашивания (рис. 4).



Рис. 4. Виды изнашивания твёрдых тел

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ

Абразивное изнашивание реализуется в условиях, если в зону трения тел попадают (или образуются там) твёрдые частицы. Эти частицы могут разрушать как более мягкое тело (истираемое тело), так и шаржироваться, т.е. насыщать поверхности материала абразивными (рис. 5), в основном пастообразными, материалами. В этом случае происходит интенсификация разрушения более твёрдого тела входящего в пару трения. Разрушение поверхности может быть результатом однократного взаимодействия абразива с поверхностью (срезание стружки) или многократного деформирования поверхности абразивными частицами.

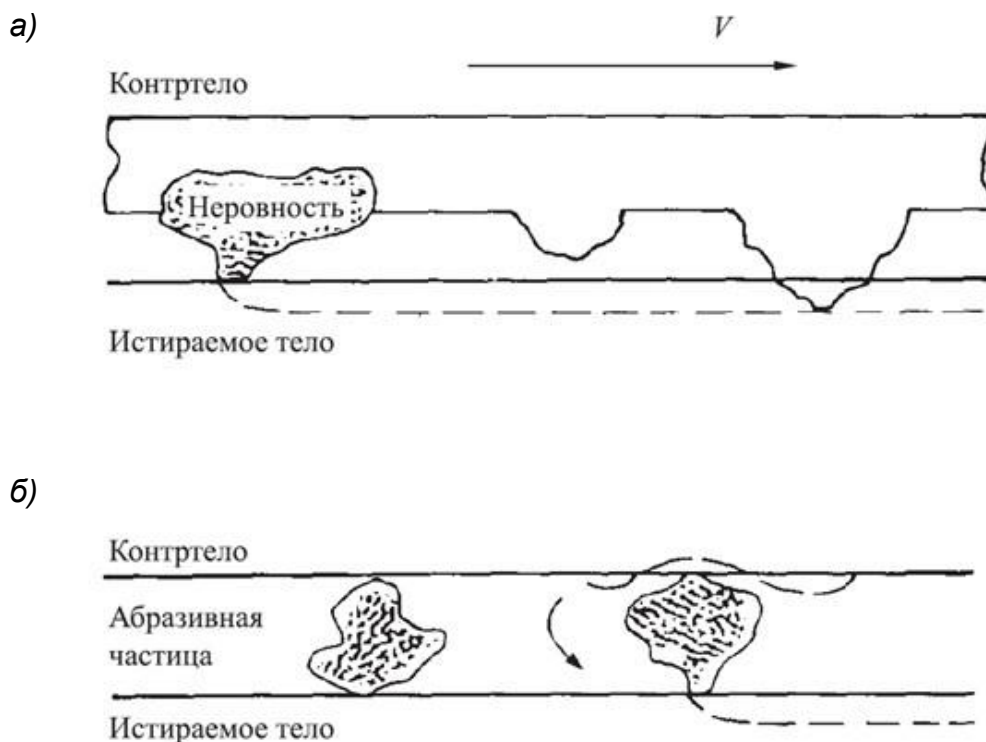


Рис. 5. Изнашивание закрепленным (а) и свободным (б) абразивом

В реальных условиях частицы абразива, попадающие в зону трения твёрдых тел, являются полидисперсными (состоящими из зерен с различной крупностью рис. 7) и по-разному ориентированными, что в свою очередь приводит к разной глубине внедрения в поверхность трения, как следствие и воздействие абразива на степень изнашивания твёрдых тел представляет собой сложную картину. Характерным при этом является то, что такая комплексная характеристика, как относительная износостойкость материалов (рис. 6) (представляющая собой отношение некоторого эталонного материала к испытуемым), при абразивном изнашивании бывает линейно связанной ствёрдостью материалов.

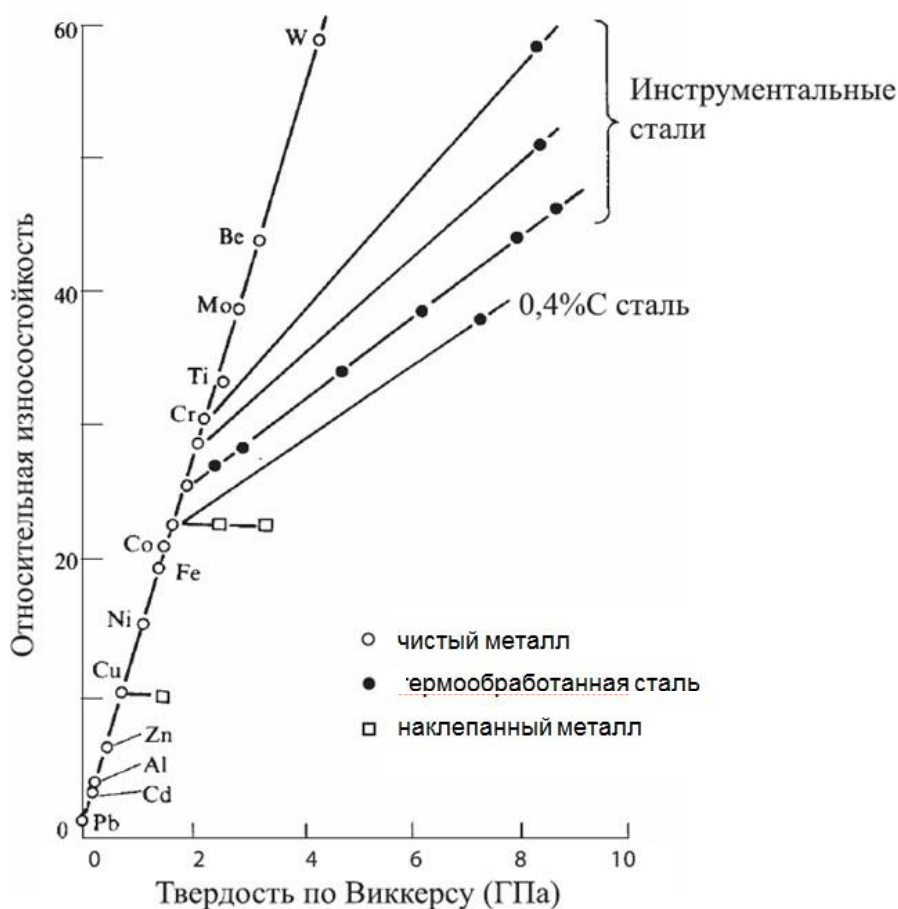


Рис. 6. Относительная износостойкость чистых металлов, термообработанных и наклепанных сталей в условиях изнашивания закрепленными частицами как функция твердости при внедрении

Эрозионное изнашивание – связано с воздействием на твёрдые тела потоков жидкости или газа не засорённых абразивом. Локальные потоки жидкости и газа бывают способными оказывать пластические и другие виды воздействия на твёрдые тела, а также вызывать их разрушение.

Газоабразивное изнашивание – представляет собой комплексное воздействие на твёрдое тело газовой струи и абразивных частиц (часто рассматривают как частный случай гидроабразивного изнашивания).

Гидроабразивное изнашивание – реализуется при воздействии на твёрдое тело потока жидкости и абразива.

Гидроабразивное изнашивание определяется как постепенная потеря исходного

материала с поверхности твердого тела за счет механического взаимодействия этой поверхности с жидкостью, в том числе при ударном взаимодействии каплями жидкости или частицами твердого тела.

Гидроабразивное изнашивание твердыми частицами является самой общей формой эрозионного изнашивания, происходящей в результате циклических ударов малых твердых частиц, увлекаемых потоком газа или жидкости и ударяющих по поверхности твердого тела. Механическое действие этих частиц подобно абразивному действию и включает пластическую деформацию и хрупкое разрушение. Однако между гидроабразивным изнашиванием и изнашиванием свободным абразивом существует ряд различий. В первую очередь, это природа сил, действующих на частицы, и природа изнашивания поверхности. При абразивном изнашивании частицы скользят по поверхности под действием внешней приблизительно постоянной силы. При гидроабразивном изнашивании на частицу, взаимодействующую с поверхностью тела, могут действовать несколько сил различной природы.

Основная сила, с которой частица действует на поверхность, связана с ее замедлением. Кроме того, интенсивность абразивного изнашивания зависит от нормальной нагрузки и пути трения, а интенсивность гидроабразивного изнашивания определяется количеством и массой отдельных частиц, сталкивающихся с поверхностью, и скоростью их удара. Интенсивность гидроабразивного изнашивания E (обычно дается в единицах массы или объема материала, удаленного с поверхности, на единицу массы воздействующих частиц) связана со скоростью v степенной зависимостью:

$$E = k \cdot v^n,$$

где k - постоянная; n - показатель экспоненты при скорости, зависящий от условий эрозии и материала. Его значение, как правило, изменяется от 2 до 2,5 для металлов и от 2,5 до 3 для керамик.

Угол атаки, определяемый относительно плоскости поверхности, как показано на рис. 7, различным образом влияет на интенсивность гидроабразивного изнашивания пластичных и хрупких материалов.

Основное различие влияния угла атаки для пластичных и хрупких материалов заключается в значении угла, при котором интенсивность гидроабразивного изнашивания максимальна. Для пластичных материалов оно приближается к $20\text{--}30^\circ$, а для хрупких материалов типа стекла и керамики составляет 90° .

Для некоторых твердых и ударновязких легированных сталей значительная степень гидроабразивного изнашивания (от $1/3$ до $1/2$ от максимальной) происходит также при нормальном падении частиц.

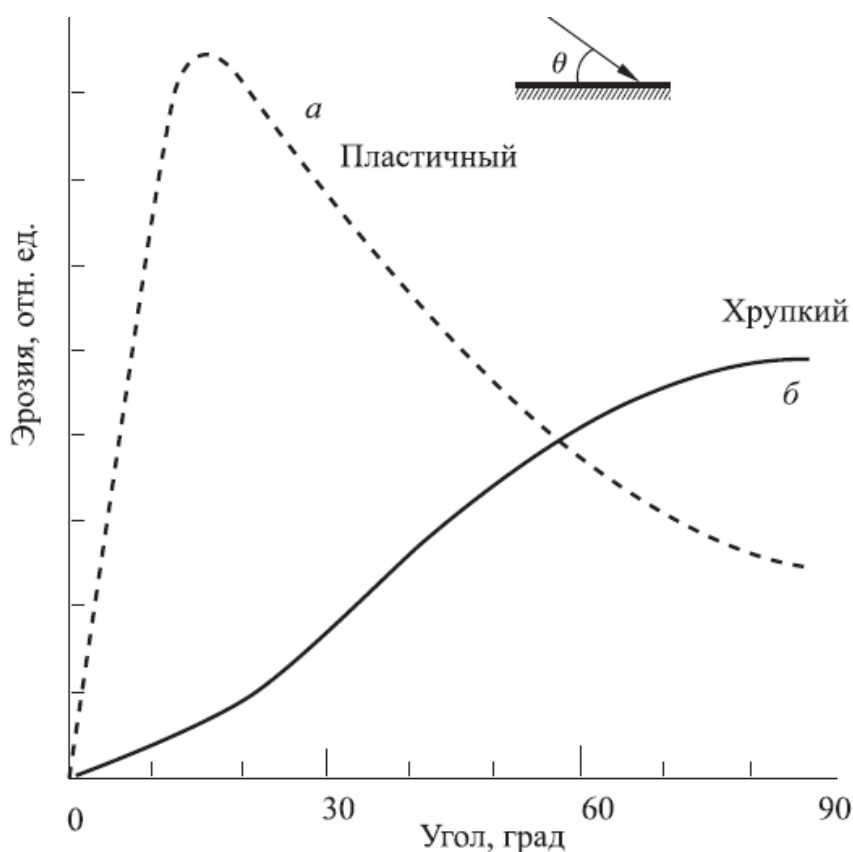


Рис. 7. Характерная зависимость интенсивности эрозии пластичного (а) и хрупкого (б) материалов от угла

Кроме того, на интенсивность гидроабразивного изнашивания влияют целый ряд характеристик частиц, например их форма, размеры и твердость. В этом отношении у гидроабразивного изнашивания много общего с абразивным действием, включая размерный эффект. Существует определенный размер гидроабразивных частиц, выше которого они оказывают малый эффект или не оказывают эффекта на интенсивность гидроабразивного изнашивания пластичных материалов.

Кавитационное изнашивание – возникает в потоке жидкости, быстро движущейся с переменной скоростью, например, при обтекании препятствий, когда возникают разрывы сплошности жидкости с образованием каверн, заполненных паром. Затем каверны захлопываются и, если это происходит у поверхности детали, жидкость с очень большой скоростью ударяется о стенку. При многократном повторении этих процессов происходит разрушение поверхности твёрдых тел (рис. 8).

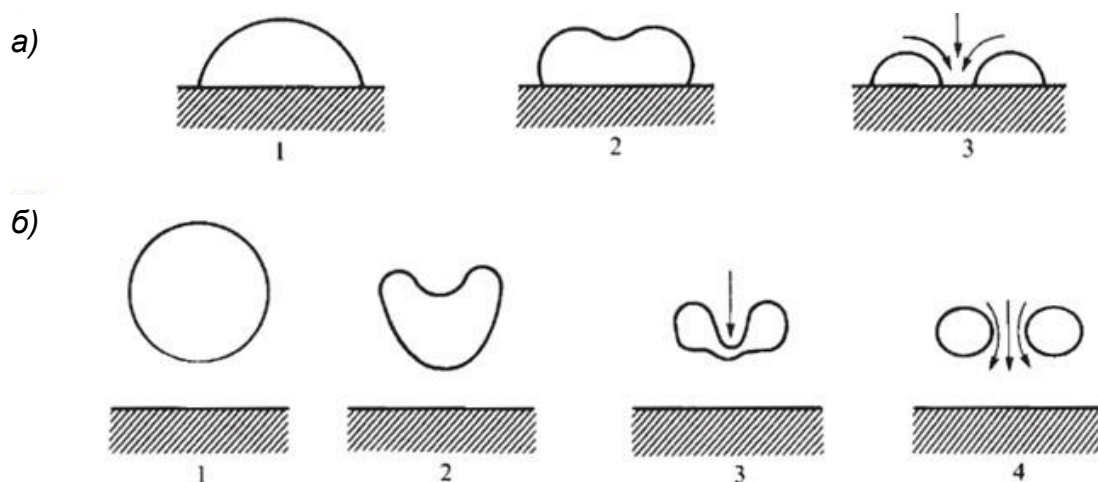


Рис. 8. Схлопывание полости в контакте с твердой поверхностью (а) и вблизи поверхности (б)

Примерами этого вида изнашивания являются повреждения лопаток гидравлических турбин и насосов, подшипников скольжения, внешней поверхности гильз цилиндров водяного охлаждения двигателей внутреннего сгорания и др.

Усталостное изнашивание возникает в результате многочисленного и упругого отеснения материала. Этот вид изнашивания характерен для узлов трения с начальным точечным или линейчатым контактом деталей: шариковых и роликовых опор, зубчатых зацеплений, кулачковых механизмов

Процесс изнашивания имеет скрытый латентный период, вследствие которого происходит накопление повреждений внутри металла. Поскольку твёрдые тела, в том числе и металлы, неоднородны, трещины возникают на несовершенствах структуры кристалла. При этом бывает некоторый инкубационный период развития субмикроскопических трещин до уровня микротрещин, период развития микротрещин до уровня макротрещин, а затем – период развития макротрещин

Интенсивность усталостного изнашивания определяется многочисленными факторами: физическими, механическими и химическими свойствами поверхности твердого тела, смазкой (при наличии таковой), составом окружающей среды, качеством поверхности, температурой и т. д. Например, рост усталостных трещин очень чувствителен к влажности атмосферы. По сравнению с влажным, в сухом воздухе для образования трещин требуется большее число циклов нагружения. Другими словами, чем суше воздух, тем меньше скорость распространения трещин в материале. Другой пример связан с влиянием смазочной пленки. Кроме всего прочего, этот эффект показывает, что усталостное изнашивание протекает даже в отсутствие прямого физического контакта тел. Пленка не исключает контакт, она только сглаживает неравномерность контактного давления.

Несмотря на снижение силы трения при смазывании и соответствующее уменьшение растягивающих напряжений, все равно происходит усталостное изнашивание, а число циклов, необходимое для повреждения поверхности, возрастает незначительно.

Наиболее часто усталостное изнашивание встречается в контакте качения, например в зубьях шестерен, подшипниках качения, кулачковых механизмах, при взаимодействии железнодорожных колес с рельсами. Разрушение поверхности, характерное для качения или качения с проскальзыванием, называется **питтингом**, т.е. это образование на поверхности контакта очень маленьких углублений. Именно усталость определяет долговечность подшипников качения. Современные модели для расчета долговечности подшипников качения основаны на концепции, предполагающей, что выносливость контакта качения определяется образованием и развитием поверхностных и подповерхностных трещин.

4. МОЛЕКУЛЯРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ

Изнашивание при заедании характеризуется результатом молекулярного взаимодействия между выступами твёрдых тел в зоне фрикционного контакта. В тех случаях, когда свободная поверхностная энергия контактирующих тел очень велика образуется прочная адгезионная связь, превышающая когезионные силы, под действием внешних сил, создающих тангенциальные напряжения, происходит схватывание и вырыв материала из менее прочного тела фрикционной пары.

Адгезия (от лат. *adhaesio* – прилипание) – возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных (твёрдых или жидких) тел (фаз), приведённых в соприкосновение

Когезия (от лат. *cohaesus* – связанный, сцепленный) – сцепление друг с другом частей одного и того же тела, обусловленное действием сил межмолекулярного взаимодействия, водородной связи и (или) химической связи между составляющими его молекулами (атомами).

По существу, схватывание трущихся поверхностей является твёрдофазной сваркой.

Важным условием реализации изнашивания при заедании является чистота рабочих поверхностей трущихся тел от плёнок загрязнений, адсорбционных, окисных и дисперсных слоев, препятствующих сближению поверхностей на расстояние действия поверхностных сил. Изнашивание при фреттинге – механическое изнашивание плотно соприкасающихся, практически неподвижных тел при их колебательном относительном микроперемещении (амплитуда колебаний такого перемещения обычно составляет 1...100 мкм). В отличие от фреттинг-коррозии окислительные процессы не играют здесь ведущей роли. В этом случае основную роль играют усталостные и адгезионные процессы.

Выделяют четыре различных режима поведения контакта при фреттинге: полное сцепление, смешанное сцепление и микропроскальзывание, макроскольжение и возвратно-поступательное скольжение.

Водородное изнашивание – это процесс разрушения металла рабочих элементов пары трения вследствие поглощения металлом водорода. Водород выделяется при трении как результат разложения водородсодержащих материалов (например, из пластмасс, из которых изготовлены ответные трущиеся тела, окружающей среды, смазочных материалов, воды, топлива и т.д.). Выделяющийся водород адсорбируется на поверхностях трения, затем диффундирует в деформируемый слой стали. Скорость диффузии определяется градиентом температур и напряжений и поскольку водород в сталях и чугунах концентрируется в наиболее нагретых местах, он скапливается в поверхностном и подповерхностном слоях металла, так как эти слои наиболее разогреты и деформируемы, а также попадает в пространственные дефекты металла. Водород, концентрируясь в этих слоях, вызывает их охрупчивание.

Для водородного изнашивания характерен особый вид разрушения поверхностей трения – мгновенное образование мелкодисперсного порошка металла. Причиной этого являются одновременное развитие зародышей трещин по всей глубине деформированной зоны и эффект накопления водорода в трещинах, что приводит при деформациях, уменьшающих объём этих трещин, к развитию в них высоких давлений и вследствие этого расклинивающего действия микротрещины сливаются, и происходит разрушение поверхностных слоев. При этом хрупкое разрушение поверхностных слоёв закалённых или слабелегированных сталей наблюдается даже при ничтожно малом количестве поглощённого водорода.

Одна из разновидностей водородного изнашивания – так называемое «водородное изнашивание разрушением» – проявляется в намазывании стали и чугуна на ответные, более мягкие материалы, из которых изготовлены трущиеся детали. Так, в керосиновых насосах стальные закаленные роторы изнашиваются на глубину до 0,03 мм, и изношенный материал намазывается на поверхность бронзового золотника, в тормозных устройствах чугун с диска намазывается на ответную пластмассовую колодку, сталь с поверхности коленчатого вала переносится на мягкий баббитовый подшипник.

5. КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ

Металлическое состояние металлов термодинамически является неустойчивым, и поэтому металлы постепенно переходят в более устойчивую аморфную (ионную) форму. Этот процесс получил широко распространенное название **коррозия**. Самопроизвольное разрушение металлических материалов происходит вследствие их физико-химического взаимодействия с окружающей средой (жидкой, газовой и твёрдой). По механизму окисления принято различать, прежде всего, два его типа: химический и электрохимический.

Химический тип характеризуется взаимодействием металла в твёрдом состоянии с адсорбированными на нём молекулами газа (например, кислорода). При наличии сродства между металлом и газом происходит химическое взаимодействие. В газовой среде этот процесс происходит за доли секунды, в жидкой – гораздо медленнее.

Электрохимический тип обуславливается переносом в электропроводящей среде ионов металла под действием электрического поля (это могут быть как внешние источники тока, так и контактная разность потенциалов). Основой для электропроводящей среды могут стать как адсорбированная на поверхности влага, так и влага в капельном состоянии. Окружающая нас среда (воздух) почти всегда несет в себе мельчайшие твёрдые частицы, в том числе и соли. Вместе с влагой они образуют необходимый для протекания этого процесса электролит.

В тех случаях, когда на поверхности металла образуется оксидный материал с плотностью, близкой к металлу, оксидный слой бывает сплошным и диффузия молекул кислорода через него существенно затрудняется. Поэтому скорость роста толщины оксидного слоя на таких металлах быстро замедляется, и на поверхности металла образуются тонкие и прозрачные пленки оксида. Этот механизм окисления характерен для инертных металлов (золота, платины, серебра).

Оксидные пленки на чёрных и цветных металлах часто отличаются по плотности от основного металла. Из-за этого оксидные плёнки, образующиеся на металле, имеют разрывы или пучности, внутрь которых попадает кислород, и процесс

окисления металлов продолжается. Для металла таких типов характерными являются более толстые слои оксидов, которые в процессе трения могут легко разрушаться и образовывать мелкие частицы абразива.

Окислительные процессы на металлах могут играть важную роль и в ускорении химических изменений смазки, которые часто приводят к образованию плёнки полимеризованного материала на самих металлических поверхностях. Такие плёнки могут быть вредными, вызывая, например, пригорание поршневых колец в двигателе внутреннего сгорания. Однако полимеризационная пленка может служить защитным слоем при абразивном износе.

При сухом трении обычно образуются более толстые и насыщенные плёнки оксидов, близких по составу и свойствам к известным оксидам металла. Так, в зависимости от условий трения и, прежде всего, от температуры на железе образуются плёнки, содержащие FeO , Fe_2O_3 и Fe_3O_4 .

Следует иметь в виду, что поскольку окисление поверхностей активируется их пластическим деформированием при трении, увеличение твёрдости рабочих элементов трущихся тел препятствует окислительному изнашиванию.

Фреттингкоррозия – это изнашивание плотно контактирующих тел при их колебательном относительном микроперемещении в условиях воздействия коррозионной среды. Изнашивание при фреттингкоррозии происходит при малых колебательных перемещениях. Это особая форма изнашивания, по условиям возникновения и характеру проявления заметно отличающаяся от обычного коррозионно-механического изнашивания при однонаправленном движении. Вследствие малой амплитуды колебаний продукты износа полностью не удаляются из зоны трения и оказывают определенное абразивное воздействие на основной металл. При этом повреждения локализуются на участках действительного контакта.

Специфический характер изнашивания при фреттинг-коррозии проявляется также в том, что окислительная среда интенсифицирует процесс изнашивания, окисление при этом протекает интенсивно и продукты изнашивания в основном представляют собой диспергированные оксиды трущихся металлов.

Такой характер окислительного процесса, при котором интенсивное окисление не приводит, однако, к образованию защитных пленок, Б.И. Костецкий связывает с динамическим характером нагружения узла трения и называет динамическим окислением.

Фреттинг-коррозия приводит к значительному ухудшению качества поверхностей и в 3...6 раз снижает усталостную прочность деталей вследствие образования концентраторов напряжений, а также снижает размерную точность сопряжений.

Фреттинг-коррозия обычно развивается при пресовых посадках на вращающихся валах в местах посадки лопаток турбин; в шпоночных, шлицевых, болтовых и заклепочных соединениях, подверженных вибрации; в подшипниках качения, передающих нагрузку в условиях отсутствия качения и т.д.; т.е. в тех случаях, когда имеют место микро-колебания и окислительная среда.

Согласно исследованиям Р.Б. Уотерхауза, для развития фреттинг-коррозии достаточно, чтобы амплитуда колебаний достигала долей микрометров. Увеличение амплитуды приводит к росту объёмного изнашивания. При достижении амплитуды 2...5 мм и более изнашивание приобретает характер обычного окислительного при однонаправленном скольжении. Увеличение частоты колебаний снижает износ при фреттинг-коррозии до определенной установившейся величины, после чего износ стабилизируется.

6. СТАДИИ ИЗНАШИВАНИЯ ТРУЩИХСЯ ТЕЛ

Износостойкость трущихся тел во многом определяется процессами, происходящими во фрикционном контакте, т.е. реальными давлениями, температурными процессами, которые в процессе эксплуатации пары трения меняются и наиболее явно выражены во времени.

По зависимости В.Ф. Лоренца можно выделить принципиально отличающиеся во времени и по механизму разрушения три стадии процесса изнашивания трущихся тел (I, II и III).

Первая стадия изнашивания, продолжительность которой составляет незначительную долю от времени работы сопряжения, получила название *приработки* пары или узла трения.

В этот период происходят процессы изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств обоих взаимодействующих фрикционных материалов. На этом этапе на площадях истинного контактирования, во многом определяющихся исходной микро-геометрией и свойствами исходного материала, реализуются очень высокие давления, температурные поля, градиенты напряжений и температур. При их действии, а также в результате взаимодействия тел с окружающей средой (воздухом, смазкой и т.д.) в зоне трущихся тел происходят значительные деформационные процессы, диффузионные процессы, меняются молекулярные взаимодействия, свободная поверхностная энергия и др., в десятки раз ускоряется протекание химических реакций.

В результате адаптации системы к условиям нагружения в поверхностных слоях трущихся тел образуются такие структуры и макро- и микрорельеф, которые, наряду с формированием в процессе приработки на поверхностях трения вторичных структур различного происхождения, обеспечивают минимизацию энергетических затрат и локализацию зоны фрикционного разрушения (износа) в тонком поверхностном слое.

Окислительно-восстановительные процессы в поверхностных слоях и диффузионные процессы в подповерхностных слоях приводят к тому, что поверхностный слой трущихся тел по своему атомно-молекулярному составу и частицы, отделяющиеся от трущихся тел, могут существенно отличаться от состава и физико-механических свойств исходного материала (по данным А. Жерве и Ю.М. Лужнова). Степень отличия этих свойств во многом связана с режимом нагружения трущихся тел и получила название трибомутации.

В свою очередь, происходящие в зоне фрикционного контакта значительные термоциклические напряжения могут оказывать влияние и на фазовые превращения, происходящие в поверхностных слоях.

Правильное и направленное использование этих явлений может во многом

повлиять на процессы, связанные с приработкой трущихся тел, и, в конечном счёте, на затраты энергии и материалов и продолжительность работы узла трения.

Для очень гладких поверхностей большую роль на фрикционное взаимодействие оказывает адгезионное взаимодействие между выступами трущихся тел.

Молекулярное схватывание и вырыв части микровыступов приводят к образованию более высоких выступов. В результате этого процесса при формировании сил трения уменьшается влияние адгезионных сил и начинают играть решающую роль деформационные процессы, а высокие выступы при трении деформироваться и срезаться. Таким образом, путём попеременного вступления

в действие адгезионных и деформационных процессов достигается некоторая равновесная шероховатость, характеризующаяся реализацией минимума сил трения и интенсивности изнашивания.

В процессе приработки при трении выделяется большое количество материала трущихся тел, по своему объёму почти соизмеримого с износом трущихся тел за весь срок нормальной эксплуатации уже приработанной трибосистемы. Во время приработки сглаживаются и в значительной степени «снимаются» несоответствия в конструкции узла трения, приобретённые как при изготовлении его деталей: несоблюдения плоскостности, отклонения в углах и диаметрах контактирующих тел и др. Так и возникшие при сборке узла трения: недостаточная посадка, перекосы и т.д.

Во второй стадии изнашивания фрикционных пар трение стабилизируется, интенсивность изнашивания снижается и в среднем остается практически неизменной. Исключением из этого могут быть отдельные всплески на этой зависимости, вызванные нарушениями в режиме эксплуатации узлов трения. Например, при запуске двигателя, когда в узлы трения ещё не попала смазка, или при работе с низкими температурами, когда в зоне трения реализуется режим масляного голодания, или в условиях, когда увеличиваются внешние воздействия, например, перегруз автомобиля или движение по крутому подъёму. В процессе постепенного изнашивания трущихся тел увеличиваются зазоры в сочленениях машины, могут возникать перекосы и перераспределение

усилий и нагрузок между парами трения. Это приводит к тому, что к концу второго периода износ трущихся тел настолько повышается, внешние воздействия увеличиваются, и период относительно стабильной работы узла трения заканчивается.

Третья стадия изнашивания начинается с момента, когда под действием динамических факторов резко увеличивается интенсивность изнашивания, достигая своей катастрофической величины, и узел трения выходит из строя (повреждается). Для разных материалов и конструкций узлов трения представленные выше стадии изнашивания будут разными по величине и крутизне хода кривых, однако общий характер их по форме сохраняется.

При работе узлов трения на интенсивность изнашивания влияют:

- 1) изменение номинальной площади контакта с соответствующим изменением контактной нагруженности узла трения;
- 2) изменение внешнего силового воздействия вследствие непостоянства приложенных к узлу трения сил;
- 3) изменение условий снабжения трущихся поверхностей смазкой (утечки, снижение вязкости смазки, потеря гидродинамического эффекта и т.п.);
- 4) изменение температурных условий работы узла трения (работа в разных климатических зонах, значительное превышение расчетных эксплуатационных нагрузок и т.д.);
- 5) нарушение кинематических связей трущихся деталей;
- 6) изменение количества и размеров твёрдых частиц, попадающих извне в зону трения (при увеличении зазора между деталями, при износе уплотнений и т.п.).

Из теории триботехники следует, что в реальном мире не существует абсолютно износостойких или не износостойких материалов, а есть режимы нагружения узлов трения – сочетание скоростей и нагрузок. При различных сочетаниях данных режимов один и тот же материал способен в большей или меньшей степени сопротивляться износу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов / А.В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
2. Лужнов, Ю.М. Основы триботехники: учебное пособие / Ю.М. Лужнов, В.Д. Александров; под общ. ред. Ю.М. Лужнова. – М.: МАДИ, 2013. – 136 с.
3. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.