

# Основные характеристики и виды изнашивания

Относительные перемещения контактирующих поверхностей и их механические взаимодействия приводят не только к изменениям состояния и свойств материалов поверхностных слоев, но и к их разрушению. Обычно разрушение происходит в форме отделения от поверхностей трения мелких частиц материала, что приводит с течением времени к изменению размеров и формы контактирующих деталей. Это явление и называют *изнашиванием*. Следует иметь в виду, что изнашивание является сложным многоуровневым процессом.

Основным инициатором изнашивания является деформация материала контактирующих поверхностей под действием контактных напряжений и температурные флуктуации. Их следствием является накопление дефектов структуры с концентрацией в поверхностном слое: текстурирование материала в направлении скольжения; химические реакции материала пары с активными компонентами среды; перенос вещества с поверхности трения в глубину либо обратно; обмен веществом контактирующих тел и т.д. Основные понятия, термины и определения в области изнашивания регламентированы ГОСТ 23.002-78. В частности, по этому ГОСТУ результат изнашивания определен термином **износ**.

# Износ, интенсивность изнашивания

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

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

где  $\Delta h$  - величина износа, (линейный износ) или толщина удаленного слоя, м;  
 $t$  - время, ч.

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

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

где  $h$  - величина износа, м, а  $L$  - путь трения, м.

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

# Усталостное изнашивание

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

Различают усталостное изнашивание двух видов: многоцикловое и малоцикловое. Многоцикловое изнашивание возникает при упругом контактировании. Многократное воздействие на микровыступ приводит к постепенному накоплению микродефектов, образованию микротрещин, при слиянии которых образуются поверхностные макротрещины, вызывающие разрушение материала и отделение частиц износа. При малоцикловом изнашивании совместное действие нормальной и касательной нагрузок при трении приводит к тому, что максимальное касательное напряжение возникает не на поверхности, а под пятном контакта на небольшой глубине,

где накапливаются повреждения и образуются трещины. У хрупкого материала трещина возникает на поверхности. Малоцикловое изнашивание наблюдается при пластическом деформировании поверхностей (без резания) более мягкого материала выступами более твердого. В местах такого деформирования нередко образуются боковые навалы, которые при последующих проходах тоже могут отделяться в виде продуктов износа.

Особым проявлением многоциклового изнашивания является так называемый **ПИТТИНГ** (англ. pit - углубление), возникающий на дорожках качения подшипников при пульсации нагрузки. Питтинг возникает в результате многократного деформирования поверхностей, нагружаемых телами качения. Язвы питтинга часто называют выкрашиванием. Кроме подшипников и направляющих качения, такой износ характерен для зубьев шестерен, шлицевых соединений и ряда других контактных пар.

# Абразивное изнашивание

Абразивные частицы производят на поверхностях трения разрушительное действие в двух основных формах. Острые абразивные частицы царапают, совершают хаотический процесс микрорезания, что наблюдается, например, при работе почвообрабатывающих или горных машин. Второй характерный механизм изнашивания - деформационное действие «тупых» абразивных частиц, которые не царапают, а выдавливают лунки или бороздки и вызывают при многократном повторении локальные усталостные разрушения.

Еще одной разновидностью абразивного износа является **гидроабразивный износ**. Гидро- и газоабразивный износ возникает при действии на поверхность потоков газа или жидкости, содержащих частицы абразива. При отсутствии абразивных частиц в струях жидкостей или газов наблюдается **эрозионный износ**.

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

# Коррозионно-механическое изнашивание

К такой разновидности изнашивания относят **окислительный износ**, **фреттинг-коррозию** и **водородный износ**.

Окислительный износ связан с активацией окислительных процессов поверхностных слоев трущихся поверхностей за счет пластической деформации, повышенной температуры, действия циклических нагрузок и наличия кислорода в смазке и окружающей среде. При окислительном изнашивании вначале, когда пленки окислов тонки (порядка долей микрометра) и эластичны, они играют положительную роль и предохраняют поверхности от повреждений. Но по мере роста они становятся толстыми, хрупкими и разрушаются при нагрузках, которые вначале легко переносили. Таким образом, окислительное изнашивание - это процесс, при котором разрушается не материал изнашиваемой детали, а его вторичные структуры - оксиды, образующиеся в процессе трения.

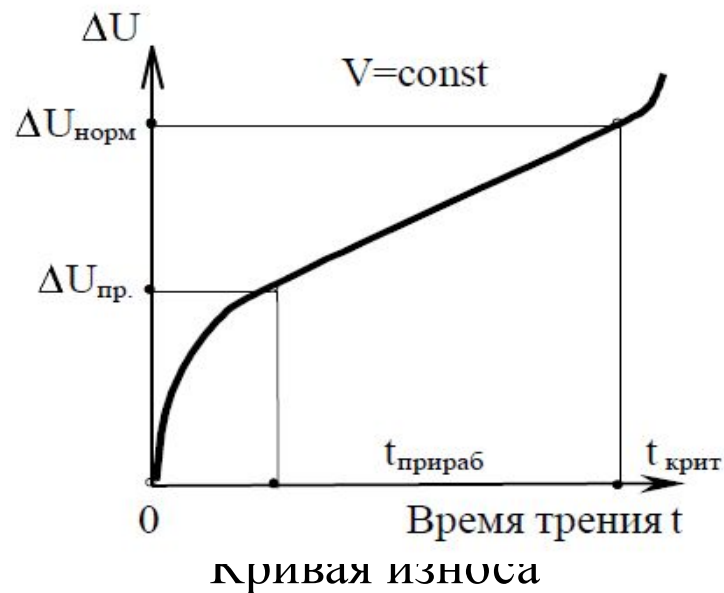
Самой агрессивной формой окислительного износа является фреттинг-коррозия (англ. Fret - разъедать). Фреттинг-коррозия наблюдается в номинально неподвижных соединениях, подверженных вибрации. Отделившиеся частицы абразивно воздействуют на поверхность. Характерные объекты подобного изнашивания - замки лопаток различных турбин, резьбовые соединения, работающие в динамически напряженных условиях.

# Водородное изнашивание

Водородный износ наблюдают в резьбовых соединениях, золотниковых и плунжерных парах, тормозных дисках и других узлах трения. Водород в парах трения образуется в атомарной форме при электрохимико-термическом разложении воды, смазок, пластмасс. Такой водород по микродефектам материала диффундирует в поверхностный слой. При этом металлические связи заменяются слабыми водородными, а материал **охрупчивается**. Водородное изнашивание впервые было открыто и исследовано российскими трибологами Гаркуновым Д.Н. и Поляковым А.А.

Несмотря на большую специфику, у всех видов изнашивания имеются общие закономерности. Рассмотрим типичную характеристику износа во времени.

Начальная часть кривой характеризует период приработки ( $t_{\text{приаб}}$ ). Затем изнашивание протекает с постоянной скоростью ( $t_{\text{приаб}}$ ,  $t_{\text{критич.}}$ ). Этот участок принято называть периодом нормальной эксплуатации. При  $t > t_{\text{критич.}}$  износ резко возрастает, становится катастрофическим.



Сформировавшуюся к концу приработки шероховатость принято называть равновесной. Равновесная шероховатость связана с исходной, но её параметры главным образом определяются физико-механическими свойствами материалов деталей и смазки, а также характеристиками режима трения (нагрузка, скорость, температура и т.д.). При введении в эксплуатацию узлов трения после изготовления или капитального ремонта в технической документации тщательно оговариваются режимы приработки, предельно допустимая величина износа ( $h_{max}$ ), определяющая ресурс всего узла трения или сменных деталей, например, вкладышей подшипников скольжения.

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

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



# Теория дислокаций

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

Общая картина выработанных представлений в этом подходе вкратце выглядит следующим образом. При трении поле внешних напряжений и температурных флуктуаций изменяет химический потенциал точечных дефектов (вакансий, межузлий) и формирует их направленные диффузионные потоки, при движении которых образуются вакансионные петли, кластеры и другие формы дефектов, а скорость их движения усиливается под действием осмотических сил. В.П. Алехин назвал этот процесс диффузионной накачкой дефектов в поверхностные слои при трении. Сама свободная поверхность при этом является областью облегченного зарождения и стока точечных дефектов и дислокаций.

Вблизи свободной поверхности образуется барьерный слой с повышенной плотностью дислокаций, который назван debris - слоем (debris - англ. осколки, мусор, свалка).

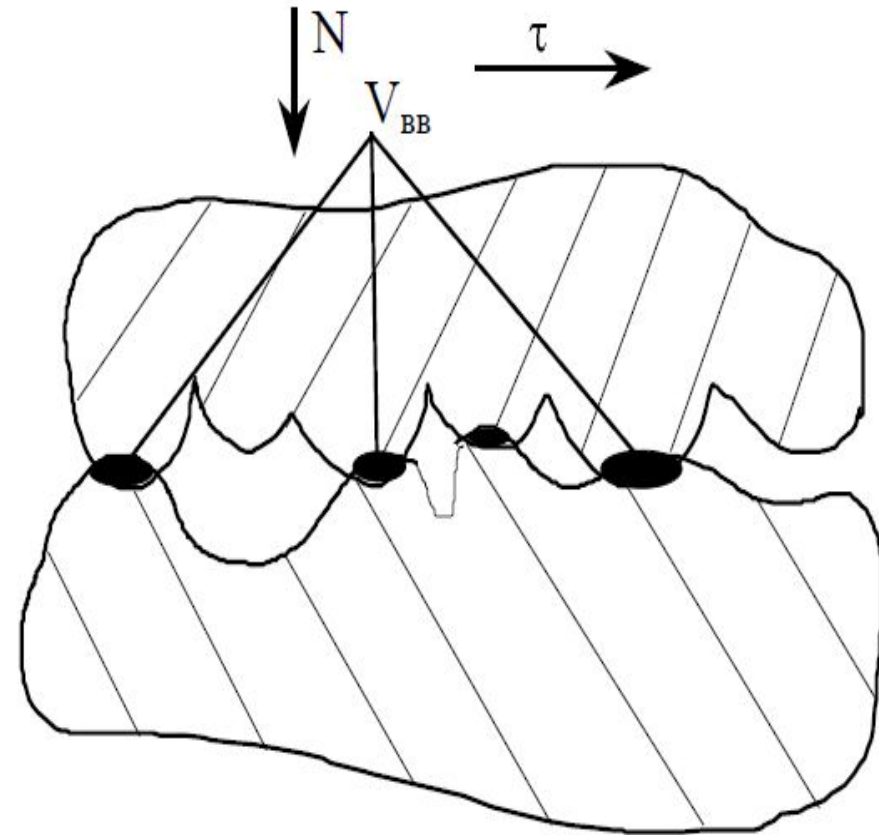
# Теория изнашивания И.В. Крагельского

(концептуальный подход)

Наибольшее распространение в России имеют расчетные методики изнашивания, предложенные И.В.Крагельским. Его концепция в лаконичной форме звучит следующим образом: **износ пропорционален объему взаимного внедрения шероховатостей  $V_{ВВ}$** . В приведенной иллюстрации можно однозначно перечислить, чем

определится объем взаимного внедрения: свойства материалов, нагрузка, параметры шероховатости, смазка.

В соответствии с этой концепцией И.В. Крагельским предложено базовое уравнение изнашивания, которое предполагает усталостный механизм разрушения поверхностей. Мерой воздействия в его подходе является число циклов нагружения  $n$ . Вывод основного уравнения И.В Крагельского сводится к следующему.



# Базовое уравнение изнашивания

● Понятие удельного износа:

$$i_n = \frac{\delta V}{A_r d}$$

Здесь  $i_n$  - объем изношенного материала при перемещении подвижной детали на расстояние, равное среднему диаметру пятна контакта  $d$ , в расчете на единицу ФПК и единицу пройденного пути. Поскольку  $V = h \cdot A_r$ , то  $i = h/d$ ,  $A_r$  - ФПК,  $h$  - толщина изношенного слоя при указанном перемещении. При сдвиге на расстояние, равное среднему диаметру пятна, ФПК разрушается и снова восстанавливается. Поэтому на пути скольжения  $L$  площадь касания воспроизводится  $n$  раз, т.е.  $n = L/d$ .

$$\Delta V = \delta V \cdot n$$

К концу пути изношенный объем составит:

Поскольку интенсивность изнашивания  $J = \Delta V/LS$ , то, приняв, что  $S$  - площадь трения равна контурной ( $A_c$ ) или, если волнистость отсутствует, номинальной площади контакта ( $A_a$ ), можно записать:

Тогда соотношение  $J/i$  с учетом формул:

$$J = \Delta V/LA_a$$

$$\frac{J}{i} = \frac{\Delta V \cdot d}{\delta V \cdot L} \cdot \frac{A_r}{A_a}$$

$$J = i (A_r/A_a)$$

# Кинетический подход

● Впервые эти модели использовались для анализа коррозионно-механических видов изнашивания, что объяснялось преимущественной ролью скорости химических реакций, протекающих на поверхности, в процессе образования частиц износа. Выражение для расчета коэффициента окислительного изнашивания:

$$k = dA \cdot \exp\left(-\frac{U}{R \cdot T}\right) / \xi^2 \cdot \rho^2 \cdot V,$$

где  $A$  - константа Аррениуса;  $U$  - энергия активации;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $T$  - абсолютная температура;  $V$  - скорость скольжения;  $d$  - длина контакта;  $\rho$  - плотность оксида.

Первая расчетная модель в России, построенная с использованием кинетических выражений для оценки интенсивности изнашивания:

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{U_0 - \mu \cdot \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}\right),$$

где  $J_0$  - константа изнашивания;  $U_0$  - энергия активации разрушаемых связей;  $\sigma$  - напряжение;  $\gamma$  - постоянная, связанная со структурой материала;  $\mu$  - коэффициент трения;  $R \cdot T$  - энергия теплового движения.