

# **ОСНОВЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

# Лекция 1. Общие сведения о работоспособности, долговечности и надежности машин

## План

1. Основные понятия, определения и термины.
2. Оценка работоспособности, долговечности и надежности машин.
3. Методы повышения долговечности деталей машин.

Терминология в области надежности содержит 24 основных термина, которые можно разделить на три группы: общие понятия, свойства и показатели.

Пять терминов: работоспособность, отказ, неисправность, наработка и резервирование являются общими понятиями. К свойствам также относятся пять терминов: надежность, долговечность, безотказность, ремонтпригодность и сохраняемость. Остальные 14 терминов служат показателями:

- гамма-процентный ресурс;
- наработка на отказ;
- средняя наработка до первого отказа;
- среднее время восстановления;
- коэффициент готовности;
- коэффициент технического использования;
- вероятность безотказной работы;
- интенсивность отказов;
- параметр потока отказов;
- ресурс;
- назначенный ресурс;
- срок службы;
- срок гарантии;
- гарантийная наработка.

## Основные понятия, определения и термины

Рассмотрим определения некоторых терминов.

*Надежность* – свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

*Наработка* – продолжительность или объем работы изделия в течение рассматриваемого периода, в часах, километрах, циклах и других единицах измерения.

*Работоспособность* – состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации.

*Отказ* – полная или частичная утрата изделием работоспособности.

*Неисправность* – состояние изделия, при котором оно в данный момент времени не соответствует хотя бы одному из требований технической документации.

*Долговечность* – свойство изделия сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта.

*Безотказность* – свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов.

*Ремонтпригодность* – свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

*Сохраняемость* – свойство изделия сохранять обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортирования, установленного в технической документации.

*Срок службы* – календарная продолжительность эксплуатации изделия до момента возникновения предельного состояния, оговоренного в технической документации, или до списания.

Предельное состояние изделия может устанавливаться по изменениям параметров, условиям безопасности, экономическим показателям и т. п.

Различают срок службы до первого капитального или среднего ремонта, срок службы между капитальными или средними ремонтами, срок службы до списания, средний срок службы и др.

*Ресурс* – наработка изделия до предельного состояния, оговоренного в технической документации.

*Гамма-процентный ресурс* – ресурс, который имеет и превышает в среднем обусловленное число ( $\gamma$ ) процентов изделий данного типа.

*Назначенный ресурс* – наработка изделия, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния изделия.

*Гарантийная наработка* – наработка изделия, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает выполнение опреде-

ленных требований к изделию при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования.

*Наработка на отказ* – среднее значение наработки ремонтируемого изделия между отказами.

*Коэффициент технического использования* – отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме этой наработки и времени всех простоев, вызванных техническим обслуживанием и ремонтами за тот же период эксплуатации.

*Коэффициент готовности* – вероятность того, что изделие будет работоспособно в произвольно выбранный момент времени в промежутках между выполнениями планового технического обслуживания.

Долговечность деталей машин главным образом определяется их прочностью, жесткостью и износостойкостью. К числу критериев работоспособности относятся также вибростойкость и теплостойкость.

### **Оценка работоспособности, долговечности и надежности**

Долговечность машины, ее отдельных узлов или деталей определяется на основании лабораторных, стендовых, полигонных или эксплуатационных испытаний. При лабораторных испытаниях имитируются эксплуатационные условия взаимодействия отдельных деталей. Для ускорения испытаний влияние главных факторов, определяющих долговечность детали, обычно усиливается.

В качестве измерителей долговечности при лабораторных испытаниях используются: относительный срок службы, относительная износостойкость, относительная усталостная прочность и др. Зная срок службы стандартной детали в эксплуатации и относительную эффективность ее упрочнения по новому методу, установленную при ускоренных лабораторных испытаниях, можно приблизительно установить срок службы упрочненной детали в эксплуатации. Полученные таким образом сведения могут быть использованы для расчета экономической эффективности предлагаемых технологических мероприятий на проектной стадии.

Для получения более точных сведений о долговечности узлов или отдельных деталей машин проводятся контрольные стендовые испытания. В этом случае детали и узлы обычно соответствуют чертежам проекта машины и испытываются в одном, а иногда и в нескольких эксплуатационных режимах. В качестве контрольных измерителей долговечности используют число часов работы, число циклов нагру-

жения при данном режиме испытаний, число включений и выключений определенного механизма, число торможений и т. д.

Стендовые испытания узлов машин или отдельных механизмов применяют для определения долговечности ответственных деталей, подвергающихся в процессе эксплуатации интенсивному износу или усталостному разрушению. Для оценки фактической долговечности машин или отдельных узлов проводят испытания на всех этапах создания и отработки конструкции и технологии изготовления: от опытных образцов до внедрения их в серийное производство и в процессе этого производства.

В методике предусматривается соблюдение соответствующих режимов работы, обеспечивающих нормальную эксплуатационную нагрузку. Если в процессе работы неизбежно изменение режимов, то в методике испытаний предусматривается периодичность чередования режимов эксплуатации. Измерителем долговечности является длительность работы до разрушения, выраженная, например, в часах, числе циклов эксплуатационного нагружения определенной интенсивности, километрах пробега, количестве обработанных изделий, гектарах вспаханной почвы, кубических метрах выбранного грунта.

Последнее время проявляется тенденция и к применению дополнительных показателей долговечности, например: число километров пробега автомобильной шины на 1 кг израсходованной резины, затраты на ремонт машины на протяжении всего срока службы, отнесенные к начальной ее стоимости, и др.

Отмеченные измерители долговечности, безусловно, не охватывают всего многообразия машин и агрегатов. По мере развития техники требования к машинам непрерывно возрастают, повышается их надежность и долговечность, и соответственно появляются новые, более универсальные измерители долговечности.

### **Методы повышения долговечности**

Долговечность машины зависит от совокупности влияния самых разнообразных факторов, которые проявляются на всех этапах ее создания и эксплуатации, при этом долговечность отдельных деталей может существенно отличаться от долговечности машины в целом. В процессе разработки конструкции машины, станка, агрегата закладываются фундаментальные основы долговечности и надежности отдельных узлов и деталей машины. Ошибка конструктора на этой стадии может привести к тому, что машина из-за недостаточной долго-

вечности отдельных деталей окажется неэкономичной или вовсе неработоспособной.

При изготовлении машины большое влияние на качество и долговечность деталей оказывают различные технологические факторы. От правильности выбора метода изготовления, назначения соответствующей упрочняющей обработки металла, качества сборки во многом зависит надежность и долговечность наиболее нагруженных сопряженных деталей и рабочих органов машины. И, наконец, в эксплуатации надежность и долговечность машины, созданной конструкторами и технологами, попадает в зависимость от индивидуальных особенностей машиниста, оператора или техника, которые в процессе эксплуатации могут оказать значительное влияние на срок службы ее деталей и механизмов. Таким образом, при создании машины и последующей эксплуатации используются разнообразные приемы повышения срока службы ее деталей и узлов.

Методы повышения долговечности деталей машины можно разделить на три основных группы: конструктивные; технологические; эксплуатационные.

Конструктивные методы повышения долговечности деталей машин включают в себя комплекс мероприятий, связанных с созданием рациональной конструкции машины. Среди них наиболее важными являются: правильный выбор конструктивного решения, от которого зависит работоспособность сопряженных деталей в эксплуатации, экономичность и эффективность агрегата, а также правильный выбор конструктором материалов и обеспечение равнопрочности деталей и узлов. Практика показывает, что неудачную конструкцию можно значительно улучшить путем правильного подбора материалов для ее деталей, но нельзя успешно эксплуатировать самую разумную по замыслу машину, если материал деталей и их свойства выбраны заведомо неверно. Чтобы обеспечить длительную эксплуатацию узлов машины, конструктор обязан предусмотреть простоту их обслуживания и ремонта.

Особым перспективным направлением в совершенствовании конструкции машины является создание саморегулирующихся и самовосстанавливающихся узлов и устройств. Сущность подобных конструктивных решений заключается в том, что система или устройство автоматически поднастраиваются или регулируются, при этом соблюдается постоянство основных геометрических параметров сопряженного узла в процессе эксплуатации.

К технологическим методам повышения долговечности деталей машин относятся мероприятия по улучшению свойств материалов,

применяемых в данной конструкции. Свойства детали начинают формироваться в процессе отливки, сварки, обработки давлением и механической обработки. При выполнении указанных операций закладываются прочностные характеристики и другие показатели долговечности будущих деталей машины. Все последующие операции изготовления детали сводятся к улучшению свойств материала заготовки. Поэтому прежде чем назначать улучшающую обработку, необходимо убедиться в правильности выбора материала и метода получения заготовки детали.

Некоторые механические характеристики стального литья, проката и поковок после нормализации могут повышаться на 50 – 100 % в зависимости от условий выплавки или обработки стали давлением. Особенно велико влияние способа получения заготовки на динамическую прочность материала. Диапазон колебаний величины ударной вязкости, например, стали Ст. 3 после отливки и после проковки находится в пределах 2,0 – 20 кГм/см<sup>2</sup>. Еще более значительно можно изменить свойства деталей, применив новые методы получения заготовок и новые материалы типа металлокерамики, пластических масс или композиционных веществ.

Дальнейшее повышение долговечности деталей машин при их изготовлении осуществляется путем применения различных методов термической и химико-термической обработки. Эти виды обработки позволяют значительно повысить прочность и износостойкость деталей. Так, после обычной закалки и соответствующего отпуска прочность углеродистой стали можно повысить в 1,5 – 2 раза, легированной в – 2 – 3 раза. В результате химико-термической обработки представляется возможным в гораздо больших масштабах, чем при термической обработке, увеличить твердость поверхностных слоев изделий до 1 200 – 2 200 кГ/мм<sup>2</sup>. Поверхностное химико-термическое упрочнение деталей машин позволяет повысить их износостойкость во много раз. Например, износостойкое борирование и хромирование увеличивают срок службы деталей, работающих в контакте с абразивной средой, в 8 – 10 раз, цементация и нитроцементация шестерен из средне-углеродистой стали повышают их износостойкость в 1,5 – 2 раза по сравнению с объемной закалкой.

Большое распространение получили также методы нанесения износостойких материалов на поверхности трения путем наплавки, напыления, плакирования. Для повышения усталостной прочности деталей применяют методы поверхностного наклепа. Эффект упрочнения в этом случае достигается вследствие изменения тонкой кристаллической структуры и создания в поверхностных слоях детали сжимающих внут-

ренных напряжений, снижения вредного влияния концентраторов напряжений, что повышает усталостную прочность материала. В качестве мероприятий, повышающих коррозионную стойкость деталей, широко используются методы нанесения гальванических, лакокрасочных, пластмассовых и эмалевых покрытий. Процесс нанесения защитных покрытий, как правило, является заключительным в технологическом комплексе операций по созданию деталей и узлов машины, и от качества его выполнения во многом зависит долговечность изделия.

\* \* \*

Машина, созданная конструкторами, технологами и заводскими рабочими, сдается в эксплуатацию, в которой проявляются новые факторы долговечности и надежности. Как бы хорошо ни была сконструирована и изготовлена машина, ее эффективное использование окажется возможным только при нормальном уходе за ней и нормальном режиме работы. Практика показывает, что полный ресурс локомотивов, станков, автомобилей, сельскохозяйственных и других машин в зависимости от условий эксплуатации значительно изменяется. При неудовлетворительном уходе имеют место случаи выхода из строя новых машин в самом начале эксплуатации. Поэтому эксплуатационные методы являются составной частью комплекса мероприятий по увеличению долговечности машин.

К ним в первую очередь относятся организационные мероприятия, способствующие реализации установленных графиков планово-предупредительного ремонта, осуществление систематического контроля за износом сопряженных деталей. Большое влияние на интенсивность износа ответственных деталей машины оказывает качество ухода за машиной в эксплуатации, особенно своевременная смазка трущихся частей, предохранение их от загрязнения. И, наконец, весьма эффективным методом продления срока службы машины или станка является применение наиболее рациональных режимов эксплуатации, исключающих недозволённую перегрузку двигателя и рабочих элементов машины.

## Лекция 2. Виды разрушения деталей машин в процессе эксплуатации

### План

1. Классификация видов разрушения деталей машин.
2. Деформации и изломы.

В практике эксплуатации машин и оборудования встречаются самые разнообразные случаи разрушения деталей. Чтобы научиться проектировать и изготавливать долговечные детали машин, необходимо ознакомиться с основными разновидностями разрушения материалов при их взаимодействии с твердыми, жидкими и газообразными телами.

Наблюдения за износом и повреждениями деталей машин в эксплуатации позволяют выделить пять основных видов разрушения материалов деталей, которые имеют свои подвиды:

- 1) деформация и изломы (хрупкий излом, вязкий излом, остаточная деформация, усталостный излом, контактные усталостные повреждения);
- 2) механический износ (истирание металлических пар, абразивный износ, питтингование);
- 3) эррозионно – кавитационные повреждения (жидкостная эрозия, кавитация, газовая эрозия);
- 4) коррозионные повреждения (атмосферная коррозия, коррозия в электролитах, газовая коррозия);
- 5) коррозионно-механические повреждения (коррозионная усталость, коррозионное растрескивание, коррозия при трении).

### Классификация видов разрушения

Рассмотрим характерные черты основных разновидностей разрушения материала деталей машин (табл. 1).

*Деформация и изломы* возникают при чрезмерном увеличении напряжений в материале детали, превосходящих предел текучести или предел прочности. Остаточная деформация приводит к изменению размеров и конфигурации детали либо к аварийному разделению детали на части (излом) с полной утратой работоспособности. В зависимости от свойств материала и характера приложения нагрузки изломы могут быть вязкими или хрупкими.

*Механический износ* проявляется в результате взаимодействия трущихся пар. В зависимости от природы трущихся тел и условий их

взаимодействия различают износ при истирании металлических пар при трении качения или скольжения и абразивный износ.

*Коррозия.* Обязательным условием для возникновения коррозии металла является наличие контакта между деталью и коррозионной средой. По характеру коррозионных сред коррозия металлов разделяется на атмосферную, газовую и коррозию в электролитах.

*Коррозионно-механические повреждения* возникают при одновременном действии коррозии и механических факторов (деформаций, напряжений, истирания). В зависимости от условий механических воздействий различают повреждения металла при коррозионной усталости, коррозионном растрескивании, трении.

*Кавитационно-эрозионные повреждения* образуются при взаимодействии с жидкостью или газом, которые с большой скоростью омывают металлическую поверхность. Различают газовую эрозию, жидкостную эрозию и кавитацию.

При высоких температурах наблюдается явление ползучести, которое заключается в том, что металл медленно и непрерывно пластически деформируется под действием постоянных нагрузок. Величина напряжения, вызывающего разрушения при повышенной температуре, зависит от длительности приложения нагрузки. Прочность материала при высокой температуре характеризуется длительной прочностью, определяемой напряжением, вызывающим разрушение при данной длительности нагружения и данной температуре (табл.1).

Указанная классификация (табл.1), безусловно, не охватывает всех разновидностей разрушения деталей машин в эксплуатации, поскольку отдельные виды разрушения материала не проявляются в чистом виде, в результате чего могут возникать промежуточные механизмы повреждений.

### **Деформации и изломы**

В результате приложения нагрузки происходит деформация материала, сопровождающаяся изменением формы и размеров детали. Различают упругие деформации, исчезающие после снятия нагрузки, и пластические, остающиеся после снятия нагрузки.

Изломом называют полное разрушение материала детали, приводящее к ее расчленению (при растяжении, сжатии, изгибе, кручении или сложном напряженном состоянии). Изломы разделяют по характеру нагружения (статический, усталостный) и по особенностям строения (хрупкий, вязкий).

Таблица 1

<i>Виды разрушения материала</i>	<i>Наименование деталей машин, подвергающихся данному разрушению</i>	<i>Характер повреждения деталей машин</i>	<i>Причины разрушения деталей машин</i>
Остаточная деформация	Поверхности качения бандажей, рельсов, напряженные болты, со- суды, подшипники скольжения	Изменения геометрической формы де- тали (удлинение, изгиб, вмятины и т. д.)	Длительное действие перемен- ных контактных, растягиваю- щих или сжимающих напряже- ний, повышение температуры металла
Вязкий излом	Связи и анкерные болты, несущие элементы мостовых ферм и других пространственных конст- рукций, напряженные болты	Разрушение, сопровождающееся зна- чительной макропластической дефор- мацией. Поверхность излома не имеет кристаллического блеска (матовая), на площадке разрушения имеются скосы, строчечные неровности, волокнистость	Значительные перегрузки вследствие резкого нарушения условий нормальной эксплуа- тации
Хрупкий излом	Сварные соединения, фасонные детали, болты, а также валики и пальцы, имеющие высокую твердость; чугунные отливки	Разрушение при незначительной мак- ропластической деформации (относи- тельное сужение гладких образцов, менее 5 %). Поверхность излома пер- пендикулярна направлению макси- мальных растягивающих напряжений и имеет кристаллическое строение, часто с рубцами, лучеобразно расхо- дящимися из зоны начала разрушения	Наличие значительных удар- ных нагрузок, дефекты терми- ческой обработки, низкое каче- ство материала, повышенное содержание фосфора, водоро- да, наличие концентратов напряжений (трещин), хладноломкость ста- ли

Продолжение табл. 1

<i>Виды разрушения материала</i>	<i>Наименование деталей машин, подвергающихся данному разрушению</i>	<i>Характер повреждения деталей машин</i>	<i>Причины разрушения деталей машин</i>
Усталостный излом	Валы, оси, шатуны, болты, сварные соединения, подвергающиеся длительному действию многократно повторяющихся нагрузок	Образование трещины или разрушение. Поверхность излома имеет зоны постепенного развития трещины, ускоренного развития излома и зону долома	Пониженная прочность материала, длительное действие знакопеременной нагрузки, циклических температурных напряжений (надрезы, неметаллические включения, микротрещины)
Истирание металлических пар	Подшипники скольжения, валы, оси, направляющие, крейцкопфы, кулисы, цепные передачи, поршневые кольца и втулки и другие детали	Постепенное изменение геометрических размеров детали	Длительное трение сопряженных поверхностей
Усталостное выкрашивание	Зубчатые передачи, подшипники качения, рельсы и бандажи подвижного состава	Возникновение на контактных поверхностях мелких осповидных выщербин, резкое ухудшение качества поверхности, нарушающее нормальную работу деталей	Пониженная контактная прочность материала, высокие контактные напряжения
Абразивный износ	Плужные лемеха, лапы культиваторов, детали гусениц тракторов, детали формовочных машин, пескометы, открытые зубчатые передачи, детали машин, подвергающиеся истиранию минеральными частицами	Постепенное изменение геометрических размеров. На поверхностях трения наблюдаются характерные риски, направление которых соответствует направлению движения абразивных частиц	Специфическое взаимодействие трущихся поверхностей с абразивными частицами

Продолжение табл. 1

<i>Виды разрушения материала</i>	<i>Наименование деталей машин, подвергающихся данному разрушению</i>	<i>Характер повреждения деталей машин</i>	<i>Причины разрушения деталей машин</i>
Заедание	Шестерни зубчатых передач, подшипники скольжения	Адгезия и вырывание частиц металла из контактирующих поверхностей	Пониженная вязкость масла и выдавливание масляной пленки при высоких скоростях и больших удельных давлениях
Ползучесть	Лопатки, диски паровых и газовых турбин, трубы паропроводов, пароперегревателей котлов	Медленная и непрерывная пластическая деформация	Нагрев выше температуры рекристаллизации, напряжения в материале выше предела упругости при данной температуре
Газовая эрозия	Направляющие и рабочие лопатки газотурбинных установок, трубы экономайзеров, кипятильные трубы паровых котлов, лопатки дымососов	Постепенное истирание поверхности твердыми частицами газового потока, волны, направленные перпендикулярно движению потока	Недостаточное сопротивление материала коррозионному действию среды и пластическому деформированию поверхностных слоев
Жидкостная эрозия	Запорные и регулирующие элементы аппаратуры трубопроводов, рабочие органы питательных насосов, судовые гребные винты, рабочие камеры гидротурбин	Характер изношенной поверхности определяется условиями воздействия потока жидкости. Разрушение имеет вид пятен, полос, рубцов, зубчатых раковин, пустот, выбоин, кратеров	Низкая коррозионная стойкость металла, высокие скорости потока, низкий предел текучести
Газовая коррозия	Детали котельных топков газовых турбин, клапаны двигателей внутреннего сгорания	Образование на поверхности детали плотного, хрупкого слоя окислов металлов	Высокая температура нагрева и низкая окалиностойкость материала

Продолжение табл. 1

<i>Виды разрушения материала</i>	<i>Наименование деталей машин, подвергающихся данному разрушению</i>	<i>Характер повреждения деталей машин</i>	<i>Причины разрушения деталей машин</i>
Кавитация	Гребные винты, детали гидротурбин, детали машин, подвергающиеся водяному охлаждению, трубопроводы	Появление на поверхности металла мелких, но глубоких питтингов, которые местами сливаются и образуют сквозное отверстие	Специфическое воздействие жидкости при высоких скоростях движения детали
Атмосферная коррозия	Кабины и кузова, детали машин, подвергающиеся действию атмосферных осадков и влажного воздуха	Образование рыхлых пленок окислов железа с последующим шелушением и возникновением очагов точечной коррозии	Неудовлетворительное нанесение защитных покрытий, плохой уход за машиной
Коррозия в электролитах	Котельные установки, экономайзеры, сосуды химической водочистки, подводные части морских судов, сосуды с жидкими удобрениями	Коррозионные питтинги, рассеянные по всей поверхности деталей, местная коррозия вблизи соединений листов и рамных конструкций	Развитие электрохимических процессов в результате неоднородности материала при наличии свободного доступа кислорода
Коррозионная усталость	Оси и штоки насосов, гребные валы, рули, металлические канаты, рессоры и другие детали, испытывающие знакопеременные нагрузки в коррозионных средах; детали автомобилей и самолетов, подверженные действию выхлопных газов	Поверхность коррозионно-усталостного излома покрыта слоем продуктов коррозии	Совместное действие переменных напряжений и коррозионно-активной среды

Окончание табл. 1

<i>Виды разрушения материала</i>	<i>Наименование деталей машин, подвергающихся данному разрушению</i>	<i>Характер повреждения деталей машин</i>	<i>Причины разрушения деталей машин</i>
Коррозионное растрескивание	Напряженные детали котлов, находящиеся под действием концентрированных щелочных растворов, сосуды из нержавеющей стали, детали, изготовленные из латуни, дуралюминия, магниевых сплавов	Появление сетки трещин по границам зерен с резким снижением прочности материала	Избирательное коррозионное разрушение границ зерен или одного из компонентов сплава под влиянием коррозионной среды и механических напряжений
Коррозия при трении (фреттингкоррозия)	Болтовые и заклепочные соединения, посадочные поверхности подшипников качения, шестерен, муфт, детали, находящиеся в подвижном контакте	Возникновение на контактных поверхностях, особенно по границе контакта, коррозионных повреждений в виде отдельных пятен или полос небольшой глубины	Непрерывное разрушение защитной окисной пленки в точках подвижного контакта

Характер приложения нагрузки и, как следствие, механизм разрушения могут быть самыми разнообразными. При кратковременной однократной нагрузке возникают статические или динамические изломы, которые могут иметь различное строение в зависимости от скорости нагружения и исходной структуры материала. Под вязким изломом понимают излом, который происходит при наличии макропластической деформации. Хрупкий излом в отличие от пластического возникает при отсутствии или при незначительных размерах макропластической деформации.

При этом пластичность излома определяют не по средней деформации образца или детали, а по наличию и степени локальной деформации в прилегающем к излому объеме материала.

Часто хрупкими считают и такие изломы, которые образуются при наличии местного сужения гладких образцов менее 5 %. Причиной хрупкого излома являются мгновенное приложение нагрузки, наличие концентраторов напряжений в опасном сечении детали, хладноломкость материала.

Возникновение пластического излома свидетельствует о том, что материал не выдержал расчетную нагрузку. Разрушение в данном случае происходит при значительных перегрузках, например, в результате предварительного выхода из строя отдельных элементов конструкции.

На рис. 1 представлены типичные хрупкий и вязкий изломы стержней периодического профиля из арматурной низколегированной стали. Причиной возникновения хрупкого излома явилось наличие концентратора напряжений в зоне термического влияния соединения, полученного методом кузнечной сварки. Излом имеет ярко выраженное кристаллическое строение, особенно крупное в районе концентратора напряжений с лучами (рубцами), веерообразно расходящимися из очага разрушения (рис. 1а). Вязкое разрушение второго стержня явилось результатом резкого увеличения действующей статической нагрузки. На поверхности излома отчетливо заметны следы пластической деформации, кристаллическое строение металла не выявляется (рис. 1б).

Детали с повышенным пределом прочности (например, закаленные болты) или с поверхностным упрочнением, находящиеся под статической нагрузкой, через некоторое время после первоначального нагружения часто разрушаются, несмотря на сравнительно низкие значения действующих напряжений. Здесь имеет место так называемое замедленное разрушение, причины которого заключаются в не-

равномерном развитии пластической деформации в микроструктуре стали.



Рис. 1. Изломы арматурной стали:  
а – хрупкий; б – вязкий

Поверхность излома при замедленном разрушении имеет макрохрупкий характер и располагается перпендикулярно направлению максимальных растягивающих напряжений. Факторами, увеличивающими вероятность замедленного разрушения, являются дефекты конструкции и монтажа, некачественная термическая обработка, наличие концентраторов напряжений, наводороживание в процессе нанесения гальванических покрытий и др. Подобные изломы можно наблюдать при замедленном разрушении болтов в эксплуатации.

Длительное действие нагрузки повышенной температуре материала детали обычно вызывает малопластичные изломы. При высоких температурах поверхность излома грубозернистая с крупными неровностями. Цвет поверхности темный, так как она покрыта окисной пленкой. Вблизи излома обычно наблюдается растрескивание металла.

Изломы при однократном или постоянном длительном действии нагрузки в практике наблюдаются сравнительно редко. Чаще встречаются так называемые усталостные изломы. Около 80 % поломок деталей быстроходных машин имеют усталостный характер.

Явление разрушения материала под действием переменных напряжений в течение некоторого срока службы называется усталостью. Способность материала сопротивляться усталостному разрушению называется выносливостью (циклической прочностью). Выносливость зависит от величины максимального напряжения и амплитуды цикла.

При симметричном цикле величина максимальных напряжений совпадает с максимальной амплитудой, в связи с чем этот вид нагружения наиболее неблагоприятен в отношении циклической прочности. Наибольшее по абсолютной величине напряжение цикла, при котором материал не разрушается при заданном числе циклов, именуемом базой, называется пределом выносливости. Наибольшее по абсолютной величине напряжение, которое материал выдерживает без разрушения при заданном числе циклов, меньшем базового числа, называется ограниченным пределом выносливости. К числу деталей, подвергающихся усталостному разрушению, относятся валы и оси автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин, железнодорожного подвижного состава и других машин.

Усталостные изломы возникают при напряжениях ниже предела текучести. Зарождению усталостной трещины способствует наличие микродефектов и концентраторов напряжений в опасном сечении детали. Типичный усталостный излом характеризуется наличием очага разрушения, зоны усталостной трещины и зоны долома. Особенностью усталостного излома является то, что вне зависимости от вязкости материала излом имеет хрупкий характер. Процесс зарождения трещины усталости начинается в точке (фокус излома) в результате наличия на поверхности микродефекта (например, риски или неметаллического включения). Возникнув в микрообъеме металла, усталостная трещина постепенно, под влиянием переменной нагрузки, распространяется в глубь тела детали. На поверхности излома наблюдаются концентрические волны, которые свидетельствуют о постепенном развитии трещины отдельными импульсами. По мере ослабления сечения шаг концентрических волн увеличивается, темп развития трещины усиливается, и при определенном остаточном сечении происходит полный долом детали.

Предел выносливости, установленный на базе  $10^6$  и  $10^7$  симметричных знакопеременных циклов, составляет обычно 30 – 60 % от предела прочности. Поэтому усталость материала часто является фактором, ограничивающим долговечность деталей. Предел выносливости при конструировании деталей устанавливают исходя из безопасного уровня вероятности разрушения.

На рис. 2 представлена фотография усталостного излома зуба шестерни из стали 30ХГТ. В изломе отчетливо виден очаг разрушения (светлая зона у поверхности).

Внешние виды усталостных изломов могут существенно различаться, однако у них имеется много общего:

1. Зарождение трещины всегда начинается в месте концентрации напряжений (подрез, шлаковое включение, микротрещина, флокен, переходная зона микроструктуры, граница сварного шва, резкое изменение сечения детали и др.).

2. Развитие трещины протекает как бы с временными паузами или остановками.

3. Независимо от того, что уровень максимальных действующих напряжений обычно ниже предела текучести, в результате беспрепятственного развития трещины происходит полное разрушение детали.



Рис. 2. Усталостный излом зуба шестерни

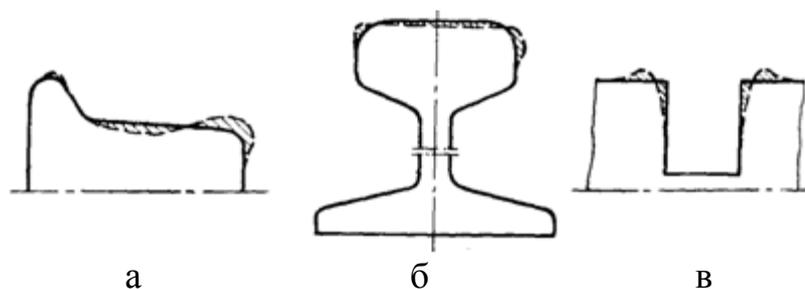


Рис. 3. Схема деформации:

а – бандажа, б – головки рельса, в – ручьев поршня тепловозного двигателя

Циклическая прочность конструкционных материалов характеризуется значительным рассеянием числа циклов до разрушения при одинаковых амплитудах напряжений. Это привело к необходимости оценки выносливости материалов статистическим путем. Работы В. В. Болотина, Н. Н. Афанасьева, С. Д. Волкова явились основой для разработки методов оценки критериев усталости.

Рассмотренные виды разрушения деталей машин являются следствием действия значительных нагрузок, превосходящих в определенный момент сопротивление детали разрушению. Однако во многих случаях циклическое действие контактных напряжений может вызвать остаточную деформацию, которая хотя и не приводит к полному разрушению детали, но может нарушить нормальные условия ее работы.

Влияние остаточной деформации на износ деталей подвижного состава исследовалось В. А. Кисликом. Установлено, что при длительном взаимодействии сопряженных деталей, например колес локомотива и рельса, происходит значительная деформация бандажа и головки рельса (рис. 3, а, б). Аналогичная картина наблюдается при работе поршневого кольца (рис. 3, в).

Значительной макродеформации подвергаются подшипники скольжения, особенно залитые мягким антифрикционным сплавом.

Во всех случаях причиной возникновения остаточной деформации является пониженное сопротивление материала действию контактных напряжений, низкий предел прочности.

\* \* \*

Для повышения долговечности деталей машин, работающих в аналогичных условиях, необходимо по возможности увеличивать предел прочности и твердость материала. Необходимо при этом помнить, что оптимальные механические характеристики материала должны устанавливаться экспериментально. При значительном повышении твердости материала развитие остаточной деформации может быть практически устранено, однако при этом возникает опасность появления в процессе работы деталей хрупкого разрушения.

В связи с этим при установлении оптимальных свойств сопряженных деталей задача сводится к определению таких механических характеристик материала, которые обеспечивают минимальную остаточную деформацию, не нарушающую нормального режима работы деталей, и исключают возникновение усталостных разрушений.

### **Лекция 3. Механическое изнашивание деталей машин**

#### План

1. Скольжение по монолитному абразиву.
2. Удар и качение по абразиву.
3. Воздействие воздушно-абразивного потока.
4. Контактная усталость машин.
5. Коррозионные повреждения деталей машин.
6. Коррозионно-механические повреждения.
7. Эрозионно-кавитационное разрушение металла.

В натуральных условиях эксплуатации различного оборудования самым распространенным является механическое изнашивание, включающее абразивное, гидроабразивное, ударно-абразивное, эрозионное, усталостное, кавитационное и некоторые иные разновидности. Однако реальным условиям работы оборудования и инструмента соответствуют различные схемы внешнего силового нагружения, изучение которых по предметному признаку трудоемко и методически нецелесообразно. Их можно систематизировать по характеру воздействия абразивной частицы на поверхность трения: трение скольжения и качения, соударение металла с абразивом, воздействие на рабочую поверхность потока абразивных частиц, переносимых воздухом или жидкостью. Это сокращает перечень методических средств, необходимых для изучения особенностей изнашивания возможных разновидностей силового воздействия абразива на поверхность трения, но сохраняет принципиальные отличия каждой схемы и позволяет исследовать основные особенности сложного, многофакторного процесса, каким является механическое изнашивание, и привносит имеет элементы универсальности. Например, в условиях трения скольжения характер силового взаимодействия единичной абразивной частицы с поверхностью трения почти такой же, как при действии на поверхность частицы иного материала или выступа, имитирующего частицу, закрепленную на поверхности трения.

Все схемы взаимодействия абразивных частиц с поверхностью имеют один общий элемент: в каждом случае отделению частицы с поверхности трения предшествует механическое разрушение металла. В свою очередь, подразделение механического изнашивания на под-

виды по принципиальным схемам упрощает силовой анализ взаимодействия частицы абразива с поверхностью трения. Силовой фактор в раскрытии механизма имеет исключительно важное значение: с ним связаны последующие поиски критериев оценки износостойкости сталей и сплавов. Кроме того, зная заранее исходные условия нагружения узла или детали, можно определить ведущую роль статических, динамических или смешанных нагрузок и их взаимосвязь с характером изнашивания. На этих исходных принципах основаны исследования механического изнашивания.

### **Скольжение по монолитному абразиву**

Изнашиванию в условиях скольжения по закрепленному абразиву подвергается многочисленное оборудование и инструмент газовой, нефтяной, угольной, строительной, горнорудной и многих других отраслей промышленности. Перечень деталей и узлов, отказ которых связан с этим видом изнашивания, чрезвычайно велик. Отрицательный эффект воздействия монолитного абразива на исполнительные органы машин и инструмента исключительно велик, а способы снижения износа от действия абразива весьма ограничены.

Эффективное воздействие монолитного абразива на металлическую поверхность обусловлено тем, что твердые включения в нем в виде зерен действуют на металл как множество режущих элементов. Прижатая к монолитному абразиву металлическая поверхность, перемещаясь, испытывает его воздействие в два этапа: на первом этапе выступающие в виде неровностей твердые частицы абразива внедряются в металл, на втором – движущаяся поверхность разрушает абразив путем сложного комплексного воздействия, конечной стадией которого является сьем частиц металла с поверхности.

Основной признак качественной картины изнашивания металлической поверхности при трении о монолитный абразив – наличие на ней хорошо различимых мелких царапин и углублений различной протяженности, всегда ориентированных в направлении движения абразива по отношению к металлу или металла по отношению к абразиву.

Образование на металлической поверхности царапин или углублений в результате деформирования и вытеснения металла на пути движения абразивной частицы дает основание заключить, что такую работу разрушения могут совершить частицы абразива, твердость и прочность которых превышают твердость и прочность металлической поверхности.

Царапины на поверхности трения имеют двойное происхождение: они образуются в результате среза металла в виде микростружки, когда металл достаточно твердый и малопластичный, или вытеснения металла абразивной частицей в «отвалы» царапины, когда резания металла не происходит вследствие его высокой пластичности. Вытеснение металла в отвалы – первый этап разрушения пластичных материалов абразивными частицами. При движении соседних абразивных частиц вблизи ранее образованных отвалов на боковых поверхностях царапины происходит вторичное передеформирование, переориентация металла отвалов в сторону царапины или его окончательное отделение от поверхности трения путем одновременного развития различных деформаций.

Для абразивного изнашивания при трении скольжения по монолитному абразиву характерно высокое внешнее силовое воздействие на поверхность металла. В этих условиях не все частицы абразива в виде выступов и неровностей способны разрушать металл путем микрорезания или многократного пластического деформирования: часть из них разрушается, не поражая металла, но создавая предпосылки к ухудшению условий скольжения по ним. Это связано с дроблением абразива и увеличением поверхности трения.

Интенсивность изнашивания при трении металла о монолитный абразив определяется соотношением прочностных характеристик металла и абразива: высокие твердость и прочность абразива определяют его способность внедряться в металл и разрушать его при движении путем резания или смятия; если металл более твердый и прочный – разрушается абразив.

Износостойкость металлов при абразивном изнашивании зависит от свойств контртела, в данном случае монолитного абразива. Не всякий абразив способен разрушать металл путем микрорезания или деформирования, хотя трение скольжения по монолитному абразиву всегда сопровождается изнашиванием, так как поверхность монолитного абразива имеет неровности, что обуславливает высокое контактное давление, деформацию металла в приповерхностном слое, нагрев, изменение формы и размеров рабочей поверхности детали.

В механизме абразивного изнашивания при трении скольжения велика роль не только твердости и прочности, но и устойчивости исходных структур при нагреве. В этих условиях охлаждающая жидкость может положительно влиять на характер взаимодействия контактирующих тел и износ поверхностей. Следует отметить, что влияние охлаждающей жидкости в условиях высоких нагрузок и разогрев более сложное, чем влияние обычного охлаждения.

Рассмотреть даже часть деталей машин и инструмента, подверженных изнашиванию при трении о монолитный абразив, не представляется возможным по причине их многочисленности. Это узлы и детали бурильного оборудования и инструмента, бульдозеров, роторных траншейных экскаваторов, строительных машин разного назначения, рабочие поверхности ходовой части машин гусеничного хода, рудомелющих агрегатов, зубья ковшей экскаваторов, трубные системы, по которым прокачивают жидкость или газ с абразивом, плужные лемеха, детали культиваторов, ножи косилок, цилиндрические втулки поршневых буровых насосов и многое другое. При всем многочисленном разнообразии условий работы деталей при трении о монолитный абразив все они имеют общее – сходство макро- и микрорельефа поверхностей контакта с абразивом.

### **Удар и качение по абразиву**

Известны многочисленные примеры изнашивания деталей машин, механизмов и инструментов, вызванные ударом по абразиву различного вида: монолитному, в виде свободно расположенных частиц на металлическом основании и глыбовидных кусков породы, монолитному абразиву, который при соударении подвергается дроблению на мелкие частицы, в виде слоя и т. д. Изнашивание сталей, сплавов и упрочняющих покрытий при ударе по абразиву изучают сравнительно недавно: долгое время не находили отличия в его природе от абразивного изнашивания в условиях трения скольжения. Удар по твердым частицам различной формы и размеров – вот сущность ударно-абразивного изнашивания и его принципиальное отличие от абразивного изнашивания других видов.

Удар – особый вид нагружения деталей машин и механизмов; действие удара усугубляется, когда в зоне соударения поверхностей формируется третье тело в виде твердых частиц, поражающих рабочую поверхность при прямом внедрении в нее. Прямое внедрение твердой частицы в металл под действием удара по ней создает углубление в виде лунки, приближенно копирующее геометрию частицы. Множественность единичных внедрений частиц при каждом очередном ударе по ним формирует на поверхности трения своеобразный макрорельеф в виде чередующихся лунок и перемычек между ними без царапин направленной ориентации, типичной для абразивного изнашивания при трении скольжения. Абразивная частица на первом этапе своего внедрения в металл при ударе должна преодолеть сопротивление металла этому внедрению; это происходит только в случае,

когда ее твердость и прочность выше, чем у металла. Когда рельеф поверхности трения при ударе по абразиву становится явно выраженным, действие единичной частицы на металл и механизм разрушения поверхности соударения усложняется явлениями, происходящими при каждом соударении. На этой стадии внедрение частицы сложной формы в кратеровидную лунку можно сопоставить с внедрением клиновидного пуансона в глухое отверстие неправильной формы. В этом случае на конечный результат внедрения частицы абразива в лунку влияют многие факторы: твердость и прочность абразивной частицы, твердость и пластичность металла, наличие соседних открытых лунок, толщина и форма разделяющих их перемычек, энергия удара и т. д. Если соотношение этих факторов будет в пользу абразивной частицы, то, попав в лунку, в момент удара она деформирует ее, углубляя и расширяя. В этом случае, когда края лунки непрочно или легко деформируются, они под действием частиц или вытесняются в соседние лунки, если металл вязкий, или хрупко выкрашиваются, если металл высокой твердости. На этом этапе внедрения частицы критерием оценки износостойкости стали является ее сопротивление срезу.

Изнашиванию при ударе по абразиву подвергаются многочисленные узлы машин и их исполнительные звенья, работающие непосредственно в контакте с абразивом. К типовым следует отнести большинство рудомелющих агрегатов, бойки пневмо- и гидроударников, бурильные монолитные долота для ударного бурения скважин при вскрытии водоносных горизонтов, ударно-штамповочный инструмент, клапаны буровых насосов, перекачивающих глинистый раствор, щековые, конусные, валковые, роторные, молотковые, центробежные, стержневые и щековые дробилки.

Многочисленные рудомелющие агрегаты являются одним из наиболее типичных примеров механического изнашивания, в том числе при ударе по абразиву. Имеется в виду большая гамма дробилок различных конструкций и назначения, барабанные стержневые молотковые, шахтные, ударно – отражательные, ролико-кольцевые, катковые, конические, коллоидные, роторно-дробильные мельницы, пневмо- и гидроударники, бурильные колонки и др.

Трение качения по поверхности с большим выступом в виде слоя незакрепленного или монолитного абразива сопровождается соударением, поэтому изнашивание в таких условиях ближе по своему механизму к ударно-абразивному. Воздействие твердых частиц абразива на поверхность детали цилиндрической формы приводит к образованию на ней лунковидного рельефа без признаков царапанья. Сопос-

тавление его с макрорельефом поверхности ударно-абразивного изнашивания показывает их полную идентичность.

Все элементы механизма формирования микрорельефа, рассмотренные применительно к ударно-абразивному изнашиванию, справедливы для случая внедрения твердой частицы в цилиндрическую поверхность при качении по абразиву. Ряд специфических особенностей внешнего силового воздействия при трении качения не вносит принципиального различия в механизм формирования рельефа и последующее отделение частиц материала.

В условиях трения качения по абразиву уровень внешней нагрузки на частицу определяется многими факторами. К числу основных относятся: скорость качения детали по абразиву, ее диаметр, толщина слоя абразива, плотность частиц в слое и их размер, механические характеристики материала детали. Вид абразива (монолитный или незакрепленный) и его расположение на металлическом основании влияют на динамику взаимодействия, рельеф, глубину лунок и износ деталей, работающих в подобных условиях.

Этому виду изнашивания подвергаются узлы и детали вращения, не защищенные от попадания абразивных частиц. Типичный пример – опора качения бурильных шарошечных долот. Попадая вместе с промывочной жидкостью в опору долота, частицы породы образуют движущийся слой, по которому перекатываются тела качения; взаимодействия роликов и шариков с абразивом при качении сопровождаются поражением поверхности трения и изнашиванием не только тела качения опоры долота, но и внутренней поверхности – беговой дорожки шарошки. По такой же схеме изнашиваются сопряжения машин гусеничного хода различного назначения, например, колеса железнодорожного транспорта при прохождении запыленных районов.

### **Воздействие воздушно-абразивного потока**

Воздействие абразивной частицы, переносимой воздушным потоком на поверхность трения, сопровождается ударом с последующим образованием на ней лунки или царапины. Уровень динамического воздействия и макрорельеф поверхности трения определяются ориентацией воздушно-абразивного потока к этой поверхности или так называемым углом атаки. При небольших углах атаки абразивная частица после соударения с поверхностью совершает направленное движение по ней; при угле атаки, близком к  $90^\circ$ , частица в момент соударения образует лунку с явно выраженными признаками деформа-

ции по ее контуру. Угол атаки абразивного потока определяет уровень и характер внешнего силового воздействия, макрорельеф поверхности трения и критерии оценки износостойкости. Малые углы атаки предопределяют скользящее действие абразивного потока на поверхность трения. Это подтверждает макрорельеф, имеющий направленные царапины достаточной протяженности, свидетельствующие о том, что после соударения абразивная частица еще некоторое время скользит вдоль поверхности. При изменении угла атаки изменяется соотношение нормальной и тангенциальной составляющих нагрузки, а следовательно, и механизм изнашивания. При углах атаки, близких к  $90^\circ$ , динамика соударения абразивного потока явно выражена, а рельеф поверхности трения весьма близок к рельефу при ударно-абразивном изнашивании и изнашивании при качении по слою незакрепленного абразива. В этом рельефе есть специфика, состоящая в отличие от рельефа при ударно-абразивном изнашивании в том, что индивидуальное внедрение единичной частицы выражено не столь четко, поскольку непрерывное действие соседних частиц искажает форму и размер образованной ею лунки. Из общего потока абразивных частиц, действующих на поверхность металла, только небольшая часть может образовывать лунки; остальные частицы действуют вокруг активных частиц, совершая удары в промежутке между активными частицами и тем самым формируя рельеф поверхности трения некоторой определенной шероховатости.

Таким образом, для изнашивания в воздушно-абразивном потоке (газоабразивном, по ГОСТ 27674–88) характерны непрерывность и множественность соударений отдельных частиц абразива, часть из которых попадает на открытые участки поверхности металла, образуя на ней лунки, другая часть воздействует по соседству с этими частицами или в промежутке между ними, не имея возможности всей формой и массой полностью участвовать в поражении поверхности. Есть еще одна группа частиц абразива, которые вообще не достигают поверхности, сталкиваясь с другими частицами на пути к поверхности либо непосредственно на поверхности металла.

Газоабразивному изнашиванию близко по характеру гидроабразивное изнашивание. Абразивная частица, находясь в потоке жидкости и взаимодействуя с поверхностью трения, разрушает ее путем микрорезания и деформирования – при малых углах атаки или образуя на ней лунки – при углах атаки, близких к  $90^\circ$ . Присутствие жидкости в зоне соударения абразивных частиц с поверхностью металла активизирует этот процесс в результате вымывания и очищения по-

верхности от мелких абразивных частиц, а также за счет расклинивающего действия жидкости в определенных условиях внешнего силового воздействия.

Абразивные частицы, движущиеся в жидкости с определенной скоростью, представляют собой более устойчивую и стабильную систему, в которой соударение частиц при их движении, отскок, рикошетирование от поверхности трения затруднены сопротивлением жидкой фазы определенной вязкости. Увлажненный абразив, по данным многих исследований, оказывает более интенсивное изнашивающее воздействие на металл по сравнению с воздушно-абразивным потоком. При определенных значениях скорости гидроабразивного потока и давления жидкости абразивное изнашивание в жидкости усиливается и усложняется малоизученным явлением – кавитации. Кавитация усложняет динамику внешнего силового воздействия гидроабразивного потока на поверхность деталей машин, существенно изменяя макрорельеф в зоне удара потока и активизируя процесс, предшествующий образованию и отделению частиц металла с поверхности трения.

Схема нагружения в этом случае более сложная, но анализ макрорельефа, сформированного под действием гидроабразивного потока и кавитации, не оставляет сомнения в том, что поверхность трения подвергается сложному силовому воздействию, при котором удар частиц абразива суммируется с кумулятивным ударом от действия жидкости. На поверхности в этом случае хорошо различимы лунки от удара частиц и разрушения типа мелкого выкрашивания, ориентированного по направлению струи жидкости, вызывающей кавитацию. Рельеф поверхности при кавитационном изнашивании имеет признаки деформирования металла. Критерии оценки износостойкости сталей и сплавов в условиях гидроабразивного изнашивания, осложненного явлением кавитации, еще предстоит выяснить.

Наиболее характерные примеры систем, подверженных газо- и гидроабразивному изнашиванию, – газо- и нефтепроводы, водоводы и т. д. Наиболее интенсивно изнашивается запорная арматура, устанавливаемая на трубопроводах.

### **Контактная усталость металлов**

Проявлением контактной усталости является усталостное выкрашивание. Этот вид разрушения деталей машин чаще всего наблюдается при трении качения и качении со скольжением, однако может иметь место и при других условиях взаимодействия трущихся пар,

например при скольжении, многократном соударении двух тел. Причиной образования повреждений, так называемых питтингов, является пульсационное действие контактных напряжений, возникающих в результате переменного давления на трущиеся поверхности.

Нормальные напряжения, возникающие на контактной площадке, имеют максимальное значение на поверхности и уменьшаются в глубь детали. Касательные напряжения достигают максимального значения на некоторой глубине от поверхности. Силы трения, возникающие на контактирующих поверхностях, значительно увеличивают касательные напряжения, которые являются основной причиной зарождения усталостных трещин, развитие которых совпадает с направлением действия касательных напряжений.

Процесс разрушения характеризуется зарождением усталостной трещины, как правило, на поверхности и постепенным развитием ее в глубь детали. Очагом микротрещины чаще всего являются неметаллические включения или другие дефекты микроструктуры, проявляющиеся по мере действия переменных контактных напряжений, которые обычно не превышают предела текучести. Зарождение трещины может происходить и на здоровых участках микроструктуры, так как в отдельных субмикрообъемах происходит постепенное расшатывание и разупрочнение слабых (неблагоприятно ориентированных) зерен с последующим образованием в них микротрещин. Развитие трещины в дальнейшем происходит так же, как и обычной усталостной трещины.

В основе контактной усталости наряду со специфическими явлениями, связанными с трением поверхностных слоев, лежат общие для всех разновидностей усталостных явлений закономерности.

Контактная выносливость характеризуется пределом усталостного выкрашивания, представляющего собой величину контактного давления при заданном числе циклов, не приводящих к питтингованию.

Особенностью явлений контактной усталости является начальное и прогрессирующее выкрашивание. В отличие от прогрессирующего выкрашивания, которое не прекращается с момента возникновения, начальное выкрашивание наблюдается только в первый период работы, а образовавшиеся питтинги в процессе работы заплывают металлом. Самозалечивание питтингов происходит вследствие повышения предела усталостного выкрашивания в результате наклепа и снижения величины контактного давления вследствие увеличения площади контакта по мере выглаживания трущихся поверхностей.

Максимально допустимые удельные давления на контактной площадке прямо пропорциональны твердости поверхности и для зубчатых зацеплений могут быть выражены приближенной эмпирической зависимостью

$$P_K \approx 0,2HB . \quad (1)$$

Для роликов при фрикционном качении величина предела усталостного выкрашивания может быть ориентировочно принята на 20–25% выше предела усталостного выкрашивания того же материала при тех же условиях работы зубьев зубчатых колес.

При использовании поверхностного упрочнения толщина упрочненного слоя должна быть больше глубины распространения максимальных касательных напряжений, а материал основы должен обладать достаточной твердостью, предупреждающей продавливание упрочненного слоя под действием контактных давлений. В противном случае возникает опасность отслаивания и растрескивания упрочненного слоя.

На развитие процесса контактной усталости влияют физико-химические свойства и способ смазки. С повышением вязкости возрастает предел усталостного выкрашивания, причем в разной степени для различных сортов смазки. С уменьшением подачи или при отсутствии смазки повышается предел усталостного выкрашивания. При этом резко снижается допускаемая по условиям заедания нагрузка. Прекращение процесса выкрашивания при сухом трении объясняется отсутствием необходимого для развития трещин усталости расклинивающего давления масла. На рис. 4 показана поверхность излома по прогрессирующей трещине, образовавшейся в цельнокатаном вагонном колесе. Трещина усталости распространяется от концентратора напряжений, которым явилось неметаллическое включение, расположенное на некоторой глубине от поверхности катания.

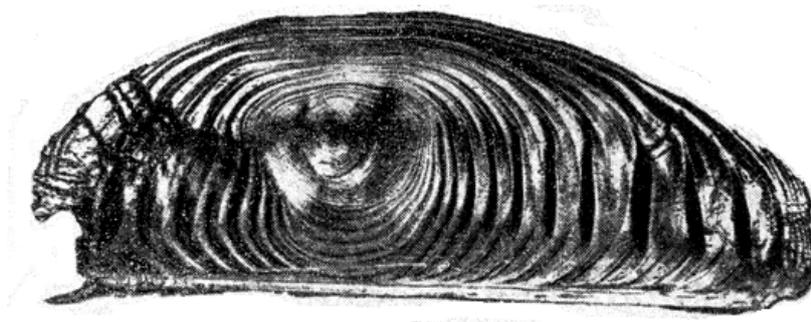


Рис. 4. Вид поверхности излома отколовшейся части вагонного колеса  
(по В. А. Кислику и А. М. Кармазину)

Рассмотренное повреждение колеса представляет собой единичный макроскопический откол (выщербину). Однако в практике эксплуатации машин чаще наблюдаются повреждения поверхности детали в виде многочисленных питтингов. Появление на поверхностях трения усталостных выщербин быстро нарушает нормальную работу сопряженных деталей. Подобное осповидное разрушение нередко наблюдается на поверхности тяжело нагруженных зубчатых колес (рис. 5), а также на беговых дорожках подшипников качения.

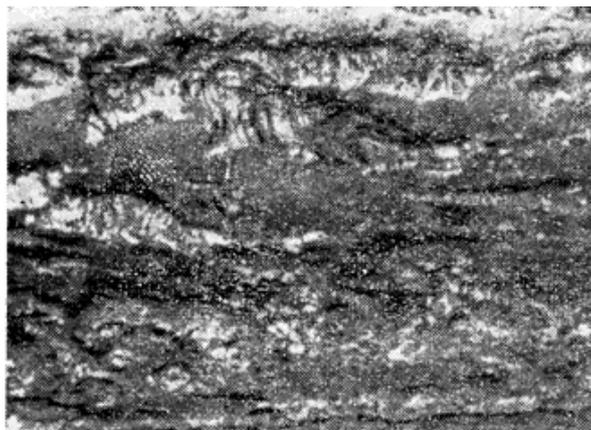


Рис. 5. Питтинги на поверхности зубчатого колеса

Мероприятия по борьбе с этим видом разрушения вытекают из самой природы явлений, развивающихся на поверхности трения. Поскольку возникновение питтингов обусловлено действием циклических контактных напряжений, то для повышения долговечности деталей машин необходимо стремиться к снижению удельных нагрузок в контакте и повышению предела прочности материала деталей.

### **Коррозионные повреждения деталей машин**

Коррозия металлов и сплавов представляет собой процесс их разрушения вследствие химического или электрохимического воздействия внешней среды.

Коррозионные повреждения имеют следующие основные особенности:

- 1) разрушение металла всегда начинается с поверхности;
- 2) внешний вид детали, как правило, изменяется;
- 3) в результате коррозии металл обычно превращается в окислы или гидраты окислов.

По характеру внешней среды коррозия разделяется на три основных вида: атмосферную, газовую и коррозию в электролитах. Рас-

смотрим кратко особенности и природу разрушения металлов в результате действия коррозии.

Процесс электрохимической коррозии объясняется действием микрогальванических элементов. В качестве анода и катода могут служить различные структурные составляющие сплава, граница и сердцевина зерна, напряженный и ненапряженный участок металла, чистый металл и его окислы. Иными словами, если на поверхности металла имеются точки или участки, существенно отличающиеся по значению электродных потенциалов, это приводит к образованию микрогальванических элементов. При этом анодные участки всегда имеют более высокий электронный потенциал и подвергаются растворению.

Гидратированные ионы взаимодействуют с водой, в результате чего образуются окислы металла ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и др.), которые обычно оседают на поверхности металла, образуя плотную или рыхлую пленку продуктов коррозии.

Действие микрогальванических элементов может протекать с кислородной или водородной деполяризацией. Поэтому скорость электрохимического процесса, прежде всего, зависит от степени аэрации корродирующей поверхности. Например, при недостатке кислорода в растворе процесс резко затормаживается, а при свободном доступе кислорода к поверхности металла – интенсифицируется.

Интенсивность процесса электрохимической коррозии зависит также от химического состава сплава; электропроводности раствора, обусловленной содержанием солей и кислот; характера и плотности продуктов коррозии, которые могут резко затормаживать электрохимический процесс, отлагаясь на корродирующей поверхности; структурной неоднородности металла (гомогенные сплавы менее склонны к коррозии); наличия и распределения внутренних напряжений, поскольку участки металла, подвергнутые действию внутренних напряжений или наклепа, интенсивнее корродируют. Характер поврежденных деталей машин, вызываемых протеканием электрохимических процессов на поверхности металлов, зависит от условий воздействия внешней среды.

Атмосферная коррозия развивается при нормальном давлении и температуре, не превышающей  $80^\circ\text{C}$ . Детали машин в этом случае находятся в контакте с атмосферным воздухом, который всегда содержит некоторое количество влаги. Мельчайшие частицы воды, являющейся электролитом (в связи с обязательным наличием в ней солей, щелочей и кислот), оседают на поверхности металла, что создает

необходимые условия для возбуждения микрогальванических элементов (микропар). Этим объясняется точечный характер атмосферной коррозии в начальной стадии. При наличии значительного количества влаги, особенно при переменном смачивании поверхности металлов, процесс атмосферной коррозии интенсифицируется, и коррозионное повреждение принимает сплошной характер.

Коррозия металлов в электролитах представляет собой случай электрохимической коррозии, соответствующий непрерывному воздействию на металл воды, содержащей значительное количество солей, кислот и щелочей. Типичным для этого вида коррозии является разрушение внутренних поверхностей металла котлов. На рис. 6 представлено коррозионное повреждение металла в котлах низкого давления.

Процесс коррозии может развиваться весьма интенсивно. Темп роста коррозии питтингов в глубину может составлять 0,5 мм в месяц и более.

При проектировании узлов машины или оборудования, предназначенного для работы в среде электролита, следует учитывать, что изготовление деталей из разнородных материалов может привести к образованию микрогальванических элементов. Во избежание этого необходимо все элементы, например, охлаждающей системы двигателя, выполнять из однородных материалов.

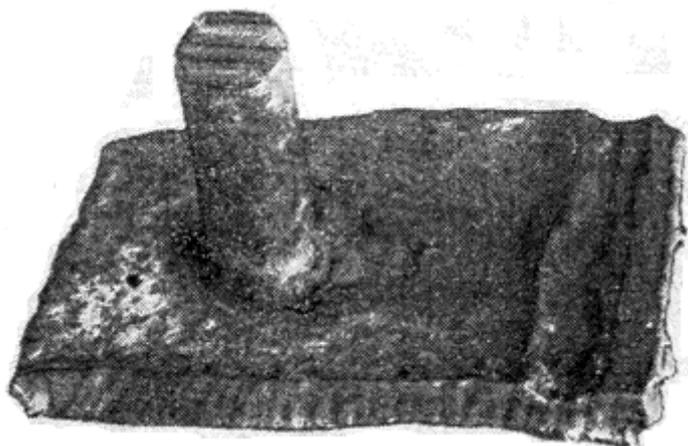


Рис. 6. Характер коррозионных повреждений в котлах низкого давления (по В. А. Кислику и В. Н. Ткачеву)

Как разновидность коррозии в жидких средах следует отметить коррозию металла в неэлектролитах. Такими средами обычно являются различные органические вещества, весьма слабо проводящие ток (спирты, бензин, керосин и др.). Процесс коррозии металла в этом

случае может происходить вследствие химического взаимодействия металла с органическими веществами. Интенсивность химической коррозии зависит, прежде всего, от химической природы органического вещества и его температуры.

Газовая коррозия является частным случаем химической коррозии. Внешней средой является газ, горячий воздух или пар. Этот вид коррозии поражает самые различные детали машин и оборудование, работающее при повышенных температурах в контакте с агрессивными газами. В большинстве случаев газовая коррозия является результатом взаимодействия кислорода воздуха с металлом. На поверхности металла образуется слой окислов (окалина), который становится хорошо заметным при температурах более 300 °С. При нагревании углеродистой стали выше 570 °С интенсивность окисления скачкообразно увеличивается. Пленка окислов имеет сложное строение, обусловленное встречной диффузией кислорода и атомов железа.

Вначале располагается слой вюстита  $\text{FeO}$ , затем следует слой вюстита и магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , за ним слой магнетита и на самой поверхности пленки окислов располагается слой гематита  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Наибольшей сплошностью обладает слой  $\text{FeO}$ . Слои магнетита и гематита покрыты густой сеткой трещин и пор. Этим обуславливается низкое сопротивление углеродистой стали окислению.



Рис. 7. Характер газовой коррозии

Такие элементы, как хром, алюминий и кремний, при взаимодействии с кислородом образуют весьма прочные и плотные окисные пленки и поэтому обладают высоким сопротивлением окислению при повышенных температурах. При легировании стали этими элементами ее сопротивление газовой коррозии резко повышается. Так, на-

пример, при содержании 12 % Cr сплав весьма устойчив при температуре 800 °С, а при содержании 22 % Cr – при температуре 900–1000 °С.

При взаимодействии металла с горячими агрессивными газами коррозионное разрушение может иметь питтинговую форму. На рис. 7 представлен характер разрушения трубы промышленной химической установки. В отдельных точках могут наблюдаться сквозные повреждения. Основными факторами, определяющими интенсивность разрушения, являются состав сплава; состав и температура газовой атмосферы; наличие на поверхности защитных покрытий. Поэтому, когда не удастся понизить агрессивные свойства газовой среды, наиболее эффективно применение легированных сталей или защитных покрытий, предотвращающих непосредственный контакт с горячим газом.

### **Коррозионно-механические повреждения**

Под коррозионно-механическими повреждениями следует понимать такие повреждения, которые возникают под влиянием коррозии и механических факторов (напряжений, деформаций, трения и др.). Влияние каждого из этих факторов в общем процессе коррозионно-механических повреждений в зависимости от условий эксплуатации может изменяться в широких пределах. Наиболее типичными видами коррозионно-механических повреждений является коррозионная усталость, коррозионное растрескивание и коррозия при трении.

*Коррозионная усталость* представляет собой процесс разрушения металлов и сплавов при одновременном действии коррозионной среды и циклических напряжений. В отличие от обычного усталостного разрушения зарождение коррозионно-усталостной трещины происходит при дополнительном действии коррозионного фактора. Последний значительно усиливает развитие повреждений в структуре металла, возникающих в «слабых» зернах в микропластической деформации. Вследствие коррозии на поверхности детали может возникнуть микроскопический питтинг, который явится концентратором напряжения и послужит причиной образования сетки микротрещин.

Процесс развития трещины коррозионной усталости протекает также более интенсивно, так как дно и стенки трещины подвергаются воздействию коррозионной среды, что увеличивает скорость роста трещины в глубину и вызывает расклинивающий эффект продуктов коррозии. Основными факторами явления коррозионной усталости

являются: 1) активность коррозионной среды; 2) уровень действующих циклических напряжений; 3) число циклов нагружения в единицу времени; 4) прочность и коррозионная стойкость сплава.

Характерной особенностью коррозионной усталости является то, что с уменьшением частоты циклов предел коррозионной усталости при одной и той же базе снижается. Изменение частоты циклов равнозначно увеличению времени воздействия коррозионной среды. По мнению Г. В. Акимова и многих других исследователей, предела коррозионной усталости нет, так как кривая усталости на графике  $\sigma$ - $\lg N$  все время снижается. Это объясняется тем, что действие коррозии может проявляться даже без циклической нагрузки.

Характер коррозионно-усталостного разрушения зависит от активности факторов, обуславливающих разрушение. При высокой агрессивности коррозионной среды и низкой частоте циклов нагружения трещина усталости имеет клиновидную форму (рис. 8а). И наоборот, при большой частоте циклов, достаточно высоком уровне напряжений и слабой агрессивности коррозионной среды трещина коррозионной усталости, возникающая на дне питтинга, по своему характеру приближается к обычной усталостной трещине (рис. 8б). Различие заключается в том, что под влиянием коррозионной среды стенки трещины окисляются и на поверхности излома, как правило, нет четко выраженных концентрических волн, подтверждающих импульсный характер развития усталостной трещины.

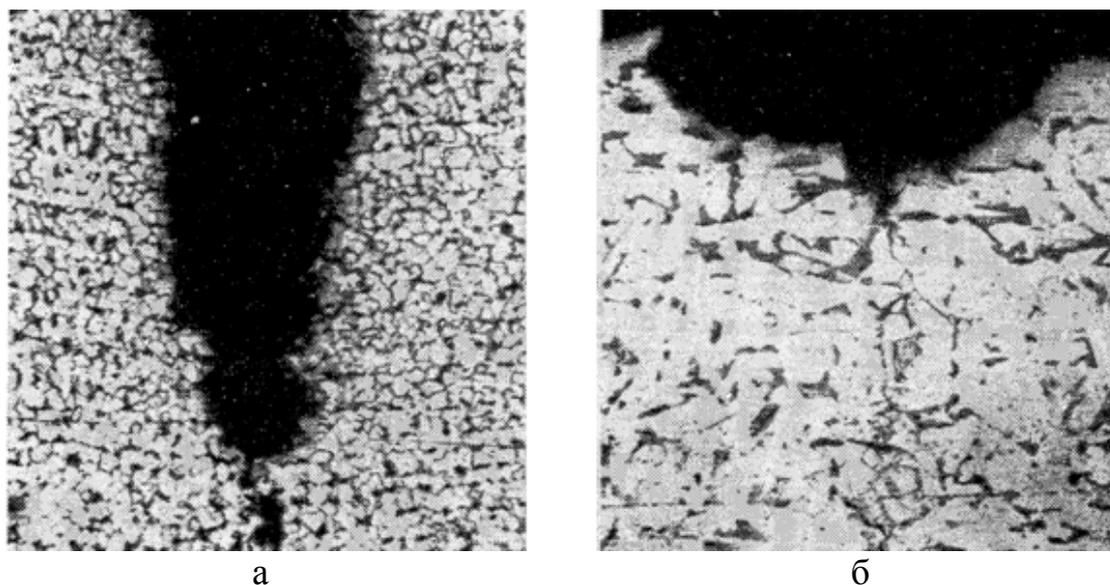


Рис. 8. Характер коррозионно-усталостных трещин:  
а – преобладающее действие коррозии;  
б – преобладающее действие механического фактора

Для повышения долговечности деталей машин, работающих в условиях коррозионной усталости, необходимо по возможности тщательно изолировать рабочую поверхность детали от коррозионной среды, снижать величину и цикличность напряжений, действующих в поверхностных волокнах металла.

Как показали опыты А. В. Рябченкова, некоторые низколегированные стали имеют в пресной воде низкую коррозионно-усталостную прочность, которая практически не отличается от прочности углеродистых сталей. С целью повышения коррозионной стойкости деталей необходимо применять стали с оптимальным содержанием легирующих элементов.

*Коррозионное растрескивание.* Этот вид разрушения возникает под действием статических напряжений и весьма агрессивной (по отношению к данному металлу) коррозионной среды. Большая опасность коррозионного растрескивания состоит в том, что при отсутствии видимых повреждений может произойти внезапное разрушение детали, находящейся под напряжением.

Природа коррозионного растрескивания изучена еще недостаточно. Однако можно установить три причины возникновения указанных повреждений: 1) пониженная коррозионная стойкость границ зерен в результате выделения из пересыщенного твердого раствора фазы с отрицательным потенциалом; 2) наличие в сплаве структурной составляющей, неустойчивой по отношению к данной коррозионной среде; 3) наводороживание границ зерен, сопровождающееся развитием значительных давлений, что приводит к уменьшению межкристаллитной прочности.

Коррозионному растрескиванию в морской воде подвержены детали из нержавеющей высокохромистой стали и сплавы на алюминиевой основе, в приморской атмосфере и дистиллированной воде сплавы на магниевой основе, в парах аммиака и растворах ртутных солей ( $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$  и др.) – сплавы на медной основе, в растворах хлористых металлов ( $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{LiCl}$ ) – нержавеющая сталь аустенитного класса, в растворах уксусносвинцовой соли  $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  – свинец.

При назначении материалов для изготовления деталей машин, работающих в агрессивных средах под напряжением, необходимо тщательно изучить все имеющиеся сведения о стойкости сплава в рассматриваемых условиях и в случае необходимости проверить долговечность деталей экспериментально. Необходимо выбрать такой

материал, который в данных случаях не подвержен коррозионному растрескиванию.

*Коррозия при трении (фреттинг-коррозия).* Повреждения металла, возникающие при одновременном действии коррозии и относительном перемещении деталей в контакте, обычно скрыты от глаз наблюдателя и поэтому часто вызывают существенные дефекты деталей машин. Процесс разрушения поверхности трения обычно протекает при колебательном движении контактирующих поверхностей с малой амплитудой. Во многих случаях относительное перемещение деталей в контакте настолько мало, что им пренебрегают. Вместе с тем практика показывает, что даже при прессовой или горячей посадке деталей, при которой, казалось бы, относительных перемещений нет, посадочные места подвергаются фреттинг-коррозии.

На рис. 9 показан образец, фреттинг-коррозия поверхности которого произошла в результате незначительных колебательных движений контактной призмы в среде электролита. Чтобы выявить влияние электрохимического фактора, контактные призмы изготовляли из меди (положительный потенциал), алюминия (отрицательный потенциал) и фарфора (диэлектрик).

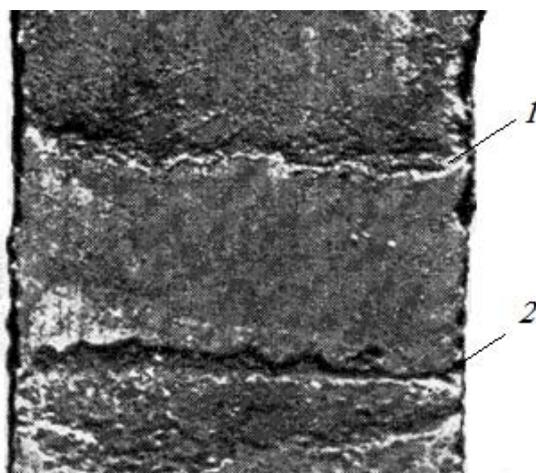


Рис. 9. Разрушение образца в контакте (по В. А. Кислику и В. Т. Ткачеву):  
1 – повреждение у заделки образца; 2 – повреждение над контактной призмой

Установлено, что даже в среде электролита (раствор солей концентрации не более 3 %) решающее значение имеет не величина электродного потенциала, и следовательно, не качество материала, а перемещения в контакте.

Механизм фреттинг-коррозии представляется как процесс периодического разрушения и последующего восстановления защитной окисной пленки в точках контакта, особенно на границе контакти-

рующих поверхностей. Скорость процесса разрушения тем выше, чем больше число циклов относительных перемещений в единицу времени и чем больше амплитуда этих перемещений. Увеличение давления в контакте также приводит к интенсификации процесса. Практика показывает, что обычная смазка не устраняет развитие фреттинг-коррозии. Процесс может быть полностью исключен только в случае устранения подвижности сопряженных элементов в контакте.

С целью повышения долговечности деталей при фреттинг-коррозии контактирующие поверхности ответственных деталей фосфатируют с последующей смазкой парафином или покрывают свинцовыми белилами с добавкой дисульфида молибдена.

### **Эрозионно-кавитационное разрушение металла**

Эрозионно-кавитационные повреждения деталей машин и оборудования возникают при действии на металл потоков жидкости или газа, движущихся с большой скоростью. При наличии непрерывного контакта со струей жидкости или газа разрушение металла может происходить весьма интенсивно. Механизм эрозии металла в потоке жидкости или газа сводится к непрерывному разрушению и удалению окисных пленок, покрывающих поверхность металлических деталей. Этому в значительной степени способствует наличие в потоке минеральных частиц. Газовой эрозии подвергаются лопатки газотурбинных установок, трубы экономайзеров, лопатки дымососов.

Основными факторами газовой эрозии, определяющими интенсивность разрушения металла, являются скорость и температура потока, а также степень его запыленности. Чтобы представить эффективность разрушения металла при высокой скорости потока газа, достаточно познакомиться с разрушающей силой небольшой струйки перегретого пара, истекающей, например, из поры сварного шва вблизи барабана котла высокого давления. Подобная струя пара способна в течение нескольких часов прорезать насквозь стенку барабана толщиной 100–150 мм. Процесс разрушения значительно интенсифицируется по мере повышения температуры газа вследствие ускорения процесса окисления металла. Образующиеся на поверхности детали окисные пленки разрушаются тем быстрее, чем выше скорость потока и чем больше в нем различных механических примесей, выполняющих роль абразивных частиц.

Таким образом, для повышения долговечности деталей машин оборудования, подвергающихся действию газовой эрозии, необходимо прежде всего повышать сопротивление металла окислению в дан-

ной газовой среде, по возможности снижать скорость потока газа и защищать рабочие поверхности металла от непосредственного воздействия на металл механических примесей, содержащихся в газе.

*Жидкостная эрозия* при определенных значениях скорости потока по своей природе мало чем отличается от газовой. Трение потока жидкости о металл вызывает разрушение продуктов коррозии (окисных пленок), которые обычно образуются в результате протекания на поверхности детали химических или электрохимических процессов. Жидкостная эрозия весьма интенсивно разрушает металл гребных винтов, деталей гидротурбин, различных трубопроводов, по которым жидкость течет с достаточно большой скоростью.

Разрушение металла в результате жидкостной эрозии в чистой воде имеет вид пятен, полос, рубцов, вымоин. При наличии в воде абразивных частиц, например песка и глины, процесс разрушения протекает более интенсивно. На поверхности деталей образуются характерные вымоины достаточно большой глубины.

Наиболее вероятный механизм разрушения металла в данных условиях имеет коррозионно-механическую природу, поэтому эффективным средством увеличения долговечности материала является увеличение его коррозионной стойкости и износостойкости.

*Кавитационное разрушение металла* возникает при определенных условиях взаимодействия потока жидкости с поверхностью металла.

Повреждение имеет каверны диаметром от 0,2 до 1,5 мм. Вокруг каверн имеются наплывы, создающие впечатление выдавленных кратеров. Таким образом, вид повреждения металла в чистой воде свидетельствует о том, что поверхность металла подвержена механическому воздействию.

Кавитация возникает в тех участках, на которых нарушается сплошность потока жидкости, в результате чего образуются пустоты и полости, заполненные воздухом или паром. Эти так называемые кавитационные пузыри, находясь у поверхности металла, сокращаются с большой скоростью и затем разрываются, что приводит к гидравлическому удару жидкости о поверхность металла. При наложении на поверхность металла огромного количества таких ударов образуются очаги разрушения.

Величина максимальных напряжений, возникающих на микроучастках металла, подверженных бомбардировке, превышает предел текучести. Об этом свидетельствует наличие наклепанного слоя в зоне такой кавитационной обработки металла. Коррозионный фактор

при кавитационном разрушении металла имеет лишь вспомогательное значение. Влияние коррозии в данных условиях сводится к снижению сопротивления металла циклическим механическим воздействиям.

По данным Л. А. Гликмана, кавитационная стойкость материала находится в тесной связи с его твердостью (рис. 10). Для однородных по составу материалов с увеличением твердости интенсивность разрушения резко снижается.

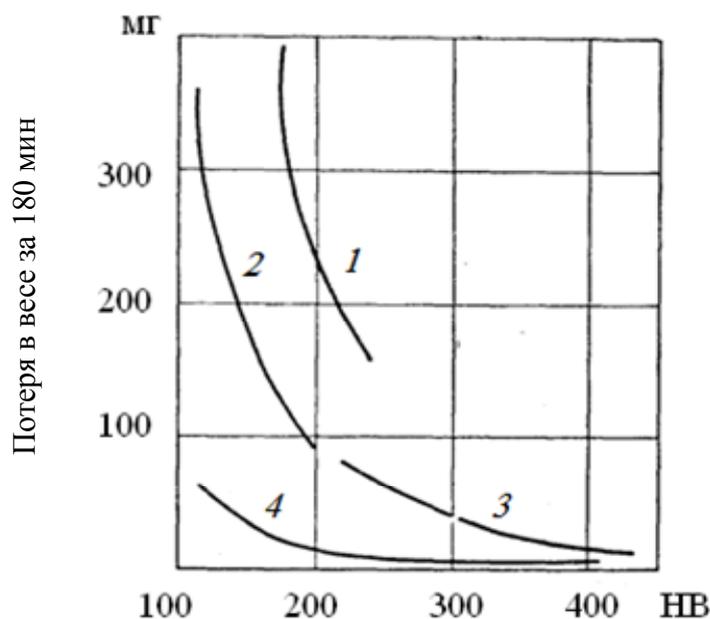


Рис. 10. Зависимость интенсивности кавитационного разрушения материалов от их твердости (по Л. А. Гликману): 1 – чугуны; 2 – углеродистые стали; 3 – сталь 1Х13 после различной термической обработки; 4 – аустенитные стали

Таким образом, для увеличения долговечности деталей, подверженных действию кавитации, необходимо повышать сопротивление материала пластической деформации, применять гомогенные материалы, которые упрочняются при пластической деформации.

\* \* \*

Перечень минеральных частиц, относящихся к абразивным, чрезвычайно велик, но наибольшее распространение по изнашивающему эффекту на рабочие поверхности деталей машин и инструмента имеет кварц (речной песок). Он встречается в почвах, обрабатываемых сельскохозяйственной техникой, строительными, землеройными и дорожными машинами, в угольных шахтах, в карьерах различного рода, практически в каждом стратиграфическом горизонте при бурении скважин на нефть, газ, воду и иного назначения. Эффективность этого

минерала очень велика и обусловлена достаточно высокой твердостью по Моосу, небольшими размерами около 1–1,5 мм и острыми режущими гранями, расположенными хаотично по всей поверхности частицы. Многочисленные другие минеральные абразивы уступают по твердости кварцу, а их распространенность в горных породах меньше (табл. 2). По этой причине речной песок – самый распространенный абразив в лабораторных опытах при изучении различных вариантов механического изнашивания.

Физико-механические свойства абразивов обусловлены структурно-текстурными особенностями, возрастом, генезисом, условиями деформирования, наличием внутренних дефектов, неоднородностью. В отличие от металлов горные породы являются материалами ограниченной пластичности, у большинства горных пород способность к остаточным деформациям проявляется лишь в условиях всестороннего сжатия при малой скорости деформации. Все минералы и горные породы при разных видах деформации в процессе испытаний являются упруго-хрупкими телами, в которых при нагружении не возникают пластические деформации: их разрушение наступает, когда напряжение достигает предела упругости.

Таблица 2

Минерал	Число твердости по Моосу	Числа твердости, по методам				
		Мартенса	Франца	Пешля	Бирбаума	Кузнецова (маятниковый склерометр)
Тальк	1	0,25	-	5	1	1
Гипс	2	0,5	3,4	15	11	2,05
Кальцит	3	1,5	20,4	50	129	8,75
Флюорит	4	8	80	167	143	13
Апатит	5	8	353	122	417	17,7
Полевой шпат	6	20	588	240	975	39,2
Кварц	7	32,5	1000	667	2700	45,8
Корунд	9	48	1500	-	5300	136

Под абразивной способностью элементарной частицы следует понимать многофакторную функциональную зависимость, отражающую влияние природных физико-механических свойств, присущих этой частице. К факторам, влияющим на абразивную способность

частицы, необходимо отнести: геометрический размер; микротвердость частицы; временное сопротивление частицы разрушению. К факторам, влияющим на абразивную способность массы, следует отнести: гранулометрический состав, микротвердость составляющих массу частиц, сопротивление абразивной массы разрушению, ее плотность.

В практике испытания материалов на механическое изнашивание известны примеры использования различных материалов в качестве изнашивающего контртела, в том числе металлических, например напильников.

Различие свойств, применяемых в качестве абразива материалов, является одной из основных причин несопоставимости получаемых результатов по оценке износостойкости сталей и сплавов.

Помимо речного песка, достаточно эффективным в методическом отношении является искусственный абразив – карбид кремния, применяемый в виде массы частиц или монолита, – шлифовальные круги. Применение этих абразивов дает хорошую сходимость и сокращает время проведения опытов.

Рассмотренные в этой лекции принципиальные основы условий абразивного изнашивания не охватывают всех частных факторов, в той или иной мере влияющих на механизм и интенсивность изнашивания; некоторые из них имеют в методическом отношении самостоятельное значение.