

Кутьин А.Б.

главный государственный эксперт
ФБУ Уральский РЦСЭ Минюста России
доктор технических наук

Семьина Е.П.

ведущий государственный эксперт
ФБУ Красноярская ЛСЭ Минюста России

СПЕЦИФИКА РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ КОНТАКТЕ С РАЗЛИЧНЫМИ СРЕДАМИ

Рассмотрены теоретические аспекты контактного разрушения при взаимодействии с различными средами (твердыми, жидкими, газообразными). Ряд положений теории разрушения подтвержден примерами из экспертной практики.

Ключевые слова: металл, поверхность, контакт, разрушение, износ, кавитация, газовая эрозия, абразивное изнашивание.

A. Kutyin, E. Semyina

THE SPECIFICITY OF THE DESTRUCTION OF METALS IN CONTACT WITH DIFFERENT ENVIRONMENTS

The theoretical aspects of the contact damage during the interaction with different media (solid, liquid, gaseous). A number of provisions of the failure theories are confirmed by examples from practice

Keywords: metal, surface, contact, fracture, wear, cavitation, gas erosion, abrasive wear.

В практике проведения экспертиз по специальности 10.4 «Исследование изделий из металлов и сплавов» рассматриваются, главным образом, случаи разрушения деталей или изделий с разделением их на отдельные части. При этом оценивается характер разрушения после статического или динамического (ударного) нагружения. По анализу поверхности излома можно определить механизм разрушения (хрупкий, вязкий или смешанный), путь распространения трещины (по телу зерна или по границам), а также тип излома – одномомент-

ный, усталостный и т.д. [1, 2]. Гораздо реже встречаются факты повреждения или даже разрушения металлов при нагрузке, либо значительно ниже допустимой, либо вообще без приложения внешних усилий. Такие случаи повреждения связаны с явлениями, протекающими при контакте металла с различными окружающими средами. В данной статье рассматриваются теоретические и практические вопросы контактного взаимодействия различного типа.

Разрушение деталей и изделий зачастую начинается с поверхности, испытыва-



Рис. 1а. Локализация повреждений на поверхности внутреннего кольца подшипника

ющей внешнее воздействие окружающей среды, которая может быть твердой, жидкой, газообразной. В условиях контактного нагружения важную роль играет физическое состояние поверхности, прочность, характер упрочнения при контактной нагрузке. Понятие контакта и контактной прочности подразумевает восприятие больших нагрузок, локализованных в малых объемах, отличающихся многократностью и динамичностью их приложения. Сопротивление внешнему воздействию контакта оказывают микрообъемы в пределах зерен, субзерен или отдельных структурных составляющих. Долговечность изделий определяется удачным сочетанием строения и свойств этих микрообъемов.

В зависимости от контактирующих поверхностей принято различать следующие виды разрушения: износ - контакт твердых тел; кавитация и кавитационная эрозия - контакт твердого тела с жидкостью; газовая эрозия - контакт твердого тела с потоком газа. Усложнение контактного нагружения может быть связано с рядом побочных явлений - с изменением температуры, окислением, возникновением электрических и других явлений. Последовательно рассмотрим указанные виды контактов.

Контакт твердых тел. Прямым результатом износа является *изнашивание* - процесс постепенного разрушения поверхностных слоев материала вследствие отделения его частиц под влиянием сил трения. Соответственно способность материала сопротивляться изнашиванию называется износостойкостью. Интенсивность износа принято оценивать специальным параметром - скоростью изнашивания, под которым понимается отношение величины износа ко времени, в течение которого он возник.

Выделим основные типы изнашивания [3].

Абразивное изнашивание. Поверхность материала изнашивается в результате режущего или царапающего воздействия твердых тел или частиц. Абразивными частицами могут являться минералы, окислы, наклепанные металлические продукты изнашивания. Они пластически деформируют поверхность контакта, выдавливая материал по сторонам царапины, или отрывают дисперсные кусочки поверхности, хрупко отделяющиеся при однократном или многократном воздействии. Как правило, такие дисперсные кусочки являются наплывами металла по краям пластически выдавленных царапин. Эти наплы-



Рис. 1б. Усталостные бороздки в дне следа контакта тел качения. X7

вы находятся в сильно наклепанном (предразрушенном) состоянии и при повторном воздействии очередными абразивными частицами хрупко отламываются.

Усталостное изнашивание. Оно носит еще одно название - контактная усталость. В отличие от абразивного износа усталостный износ появляется не сразу, а лишь после большого числа циклов нагружения одного и того же участка поверхности. Типичным примером является возникновение поверхностных и подповерхностных трещин и поверхностного выкрашивания в подшипниках качения, где имеет место трение качения или качение с проскальзыванием, а контакт деталей - сосредоточенный. Природа возникновения трещин и выкрашивания в данном случае та же, что и при обычной усталости. На рисунке 1а показана локализация эксплуатационных повреждений, образовавшихся на поверхности внутреннего кольца подшипника ступицы колеса, в виде выраженной дорожки - следа контакта тел качения. След состоит из группы мелких вырывов материала с блестящей поверхностью относительно равной



Рис. 2а. Вид неровностей на поверхности ротора. х5



Рис. 2б. Вид металлических частиц, обнаруженных внутри камеры. х20

глубины, в дне которых образовались расходящиеся параллельные удлиненные впадины и выступы (бороздки), характерные для усталостного разрушения (рис. 1б). Образование следов усталостного изнашивания металла может служить признаком эксплуатации узла в условиях недостатка смазки, хотя бы эпизодического характера, наличия в смазке загрязнений, несоосности деталей при монтаже и т.д., и способно привести к излому тел качения.

Изнашивание в результате пластической деформации. В отличие от предыдущих типов данный вид износа не связан с уносом материала и снижением массы изделия, а приводит к изменению геометрии изделия. Если деталь изготовлена из пластичного материала и работает при повышенной температуре, то возможен сдвиг поверхностных слоев в направлении скольжения без достижения момента разрушения. Изменение формы детали может явиться причиной выхода ее из строя.

Изнашивание при хрупком разрушении. В процессе контакта двух твердых тел в поверхности могут протекать следующие процессы: наклеп тонкого поверхностного слоя с одновременным его охрупчиванием; насыщение поверхностного слоя элементами (содержащимися в окружающей среде), вызывающими его охрупчивание; сильный локальный разогрев при трении, способствующий необратимым структурным изменениям, связанным с образованием хрупких фаз (например, в сталях местный фрикционный нагрев способен вызвать даже закалку на мартенсит). Любая из этих причин может привести к растрескиванию

и полному удалению сверхтонкого поверхностного слоя, после чего обнажается внутренний слой и процесс повторяется, постоянно уменьшая живое сечение изделия.

Адгезионное изнашивание. Такое явление вызывается взаимодействием между тесно сближенными поверхностями металлов, которое приводит к прочному «схватыванию» и «срачиванию» их в местах контакта, то есть соединению на атомарном уровне, когда происходит восстановление связей между атомами трущихся деталей [4]. Такое состояние возможно, когда в результате контактирования двух деталей на их поверхностях образуются ювенильные (свободные от окисной пленки, идеально ровные, а значит, сближающиеся до расстояний, соизмеримых с межатомным) участки. Соединение возможно без повышения температуры, и если место соединения в результате наклепа окажется прочнее основного металла, то разрушение произойдет по основному металлу. В результате происходит перенос металла с одной детали на другую с образованием соответственно выступов и впадин. Проиллюстрируем данный тип изнашивания примером из экспертной практики. На рисунке 2а представлен вид поверхности ротора вышедшего из строя топливного насоса автомобиля – неровной, шероховатой, с множественными хаотически расположенными мелкими выступами и впадинами, разными по форме. Такими же морфологическими признаками характеризуется и поверхность роликов, расположенных в плунжерах. Измерения показали одинаковую твердость роликов и ротора (59-60 HRC). Внутри камеры насоса обнару-



Рис. 3. Следы износа на внутренней поверхности фрагмента сателлита

жены множественные мелкие частички чешуйчатого вида, форма и размеры которых сопоставимы с выступами и впадинами на роторе и роликах (рис. 2б). В совокупности морфологические признаки повреждений поверхностей характерны для образования их при чрезмерном внешнем давлении роликов на ротор насоса, создаваемом пружиной. При таком давлении трение качения частично переходит в трение скольжения, что приводит к разрыву окружающей жидкости и «схватыванию» металлических контактирующих поверхностей с повышением критического удельного давления. Это качественное изменение процесса трения и износа вызывает локальный разогрев тонких поверхностных слоев, несмотря на наличие жидкости (топлива), пластическое течение и отрыв частичек металла. Подобный процесс может происходить также при торможении вращения роликов за счет попадания под ролик твердых частиц из жидкости или резкого повышения вязкости жидкости.

Тепловое изнашивание. В основе этого вида изнашивания лежит явление сварки без оплавления. Известно, что совместное воздействие температуры и давления приводит к соединению (схватыванию) контактирующих поверхностей. Давление к контактирующим поверхностям прикладывается извне, а температура повышается за счет трения. При взаимном перемещении трущихся поверхностей места соединения вырываются из основного металла, и поверхность покрывается надрывами и выступами. Эти дефекты поверхности трения существуют, если температура разогрева поверхности не велика. Если температура приближается к температуре плавления материала, то наблюдается налипание и размазывание металла на трущихся поверхностях. В данных местах образуются тонкие пленки расплавленного металла, уносимые с поверхности при взаимном проскальзывании.

Разрушение может произойти при сухом трении скольжения в условиях критически высоких контактных нагрузок, возникающих в трущихся парах. Примером эксплуатационного разрушения с участием механизма теплового изнашивания может быть излом сателлита представленной на экспертизу пары трущейся пары - ось сателлита- сателлит дифференциала автомобиля (рис. 3). В этом случае наблюдался перенос металла с поверхности одной детали на другую с его налипанием и размазыванием. По мере накопления в зоне контактирующей пары продуктов износа металла до критической величины, исключающей их проскальзывание, возникло заклинивание узла: сателлит на какой-то момент «сваривался» с осью, а затем отрывался, что приводило к образованию статической нагрузки в динамическую. В тот момент, когда уровень действующих напряжений превысил предел прочности изделия, произошло разрушение с разделением сателлита на части.

Окислительное изнашивание. Суть данного изнашивания состоит в образовании на трущихся поверхностях окисной пленки за счет кислорода воздуха или иной окружающей среды. Эти пленки играют двойную роль. С одной стороны, они предотвращают непосредственное сближение трущихся поверхностей и противодействуют схватыванию. С другой стороны, растрескивание и удаление хрупких пленок определяет сам процесс изнашивания. Открытая поверхность металла вновь окисляется и процесс повторяется. Интенсивность протекания процесса окисления и толщина окисленного слоя контролируются температурой, повышающейся в результате трения, давлением на контактной поверхности и скоростью взаимного перемещения трущихся поверхностей.

Отдельно следует выделить фреттинг-коррозию - изнашивание мест сопряжения деталей, находящихся под нагрузкой, при незначительном взаимном перемещении. Кусочки окисных пленок, отделяющиеся с поверхности контактирующих деталей, действуют как абразив, который вследствие малых относительных перемещений не удаляется за пределы контакта.

Контакт твердых тел и жидкостей. Результат этого контакта ощутим лишь при значительных скоростях потоков жидкости, когда происходит нарушение сплошности потока и в нем образуются пузырьки пара или газа. Такие полости возникают в тех



Рис. 4а. Вид неровностей на поверхности на рабочей поверхности внутренней шестерни. х8



Рис. 4б. Глубокие царапины на опорной части корпуса насоса. х1,5

областях потока, где давление паров жидкости ниже соответствующего данной температуре. Одновременно наблюдается их уничтожение (аннигиляция) в областях повышенного давления. Таким образом, в скоростном потоке жидкости происходит непрерывный процесс образования газовых пузырьков и их последующее исчезновение. Это явление получило название кавитация (cavitas - пустота). При замыкании полостей поверхность металла, контактирующая с жидкостью, подвергается гидравлическому микроударному воздействию, в результате которого и происходит разрушение поверхности [5]. Существенную роль в возникновении и развитии кавитации играет состояние поверхности твердого тела, контактирующего с жидкостью. Конфигурация и шероховатость поверхности твердого тела определяет завихренность потока жидкости, прилипание пузырей к поверхности, смывание и замыкание их. Поэтому обычно стремятся к получению более гладких поверхностей (шлифованных и полированных) деталей, контактирующих с потоком.

При взаимодействии газовых пузырьков, находящихся в жидкости, с поверхностью металла на ней образуются специфические мелкие ямки округлой формы. На рисунке 4а показан вид рабочей поверхности ротора масляного насоса с многочисленными участками разрушения металла в виде мелких вырывов округлой формы. Характер разрушения металла свидетельствует о протекании кавитационного изнашивания в процессе работы насоса при специфическом взаимодействии газовых пузырьков, находящихся в жидкости, с поверхностью деталей. Подобный процесс возникает при постоянном попадании в жидкость газов и развивается в течение длительного времени. Металл, который выкрашивается из поверхности детали при кавитации, попадает в жидкость и вызывает поверхностное разрушение окружающих трущихся поверхностей деталей изделия. Именно так на внешней поверхности наружной шестерни произошло образование кольцевых задиров (рис. 4б), которое связано с появлением в масле частиц металла – продуктов кавитации. Кавитация возникла при попадании воздуха в масло и затем в масляный насос, например, при эксплуатации автомобиля при уровне масла ниже минимально допустимого. Определить момент возникновения кавитации и так называемый порог кавитации можно акустическим методом (появление кавитационного шума), оптическим (скоростная киносъемка), механическим (появление заметных разрушений на поверхности контактирующего материала). Степень разрушения материала определяется по потере массы детали, фиксируемой через определенные промежутки времени.

Контакт твердых тел и газовых потоков. Газовый поток, контактирующий с металлом, может вызывать эрозию его поверхности. В этом случае разница в воздействии скоростного газового потока на металл по сравнению с жидкостью будет определяться разницей плотностей сред. Плотность газа значительно меньше плотности жидкости и для разрушения поверхности металла требуются более высокие скорости газа или более длительное воздействие среды.

При контакте твердых тел с жидкостями и газовыми потоками обнаружено много общих явлений. Кавитационное разрушение и эрозия начинаются с появления шероховатостей на поверхности. Постепенно развивается рельефность, и образуются канавки в направлении потока. Неоднородность структуры и



Рис. 5. Вид множественных точечных поражений и раковин на внутренней поверхности фрагмента аварийного участка трубы подающего трубопровода тепловой камеры.

различия в свойствах отдельных структурных составляющих обуславливают избирательное разрушение в наиболее слабых местах. Так, в случае, когда сплав имеет гетерофазную структуру, более подверженным разрушению может оказаться менее твердая фаза.

Влияние активных жидких веществ и газов на свойства и разрушение металлов. В процессе эксплуатации металлических конструкций их поверхность неизбежно контактирует с химически активными газами или жидкостями окружающей среды. При этом может происходить существенное изменение механических свойств материалов. В случае влияния внешней среды разрушение наступает, когда величина коэффициента интенсивности первоначально приложенных напряжений ниже рассчитанного значения. Это связано со снижением предела текучести материала при контакте его поверхности с активными веществами. Данный эффект вызван физико-химическими процессами, протекающими на поверхности и в объеме материала.

Влияние среды может быть необратимым и обратимым, то есть механические свойства материала либо не восстанавливаются, либо полностью восстанавливаются при удалении действующего на его поверхность вещества.

Необратимое влияние окружающей среды.

Коррозионное растворение. (Под коррозией принято понимать переход части материала в продукты окисления). Проявляется, как правило, в условиях окисления поверхности изделия. Уменьшение при этом геометрических размеров последнего приводит к уменьшению его конструктивной прочности.

Так, например, на экспертизу был представлен фрагмент трубы подающего трубопровода тепловой камеры со сквозным разрушением («порывом») стенки. При исследовании установлено, что толщина стенки на аварийном участке уменьшена на величину до ~ 90 %. При этом на наружной поверхности фрагмента трубы трубопровода по месту сквозного разрушения имеются повсеместно выраженные неровности материала с шероховатым дном и отслаивающимися частицами пластинчатой формы. Морфологические признаки повреждений характерны для сплошной коррозии металла с разрыхлением и потерей поверхностных слоев изделия. На внутренней поверхности определяются множественные локальные повреждения в виде отдельных точечных поражений (питтинга) и раковин (язв) с неровным, шероховатым дном (рис. 5). Данные повреждения имеют признаки образования при потере материала вследствие химического (электрохимического) взаимодействия металла с коррозионной средой (водой), механического воздействия потока жидкости, движущихся частиц теплоносителя, песчинок твердых тел, газовых пузырьков и т.п. Размеры локальных повреждений различны, глубина их достигает величины, соизмеримой с толщиной стенки. Глубокие точечные поражения и раковины на внутренней поверхности объекта, являющиеся острыми концентраторами напряжений, послужили очагами последующего сквозного разрушения стенки. Таким образом, условиями образования «порыва» стенки трубы трубопровода являются результаты разрушения металла по коррозионно-эрозионному механизму, вызвавшие критическое (до ~ 90 %) уменьшение сечения и, следовательно, снижение конструктивной прочности объекта.

Водородное охрупчивание. Водород может поступать в металл различными путями. Так, распространенной причиной присутствия водорода является его заметная растворимость в расплаве при выплавке и образование внутренних дефектов слитка - водородных пузырей или флокенов при последующей кристаллизации вследствие резкого уменьшения растворимости в твердой фазе. Большое локализованное давление, связанное с этими газовыми полостями, определяет образование множества острых трещин, поверхность которых контактирует с водородом флокена. Водород может попасть в металл также при сварке из

влажной обмазки электрода или из воздуха. После диффузии водорода в основной металл реализуется образование так называемых «холодных трещин» в зоне теплового воздействия сварки. Водород может попасть в металл и при выдержке в атмосфере, содержащей водород. Широко известно наводороживание обсадных труб нефтяных скважин, содержащих сероводород. Следует отметить, что в последнем случае увеличение содержания водорода в металле и связанное с этим охрупчивание невозможно без наличия напряжений в металле. Известно, что скорость переноса водорода по дислокациям может на несколько порядков превосходить скорость, связанную с решеточной диффузией. Поэтому водород склонен скапливаться в местах с повышенной плотностью дислокаций, например, у границ зерен. В этом случае вероятным становится межзеренное разрушение.

Коррозионное растрескивание под напряжением. Коррозионное растрескивание представляет собой хрупкое разрушение, происходящее в результате длительного действия статических напряжений (внешних или внутренних) и коррозионной среды. Роль напряжений при коррозионном растрескивании заключается в следующем. Поверхность металла защищена окисной пленкой, и реакция окисления не протекает. Если в металле имеются напряжения, то начинается локальная пластическая деформация в области у вершины трещины. При этом защитная окисная пленка у вершины трещины разрушается, а вдали от вершины остается неразрушенной. Свободный от защитной пленки металл у вершины трещины реагирует с агрессивной средой. Продукты реакции контактируют с поверхностью металла в вершине трещины и уменьшают работу образования новой поверхности из-за понижения свободной поверхностной энергии металла. В результате приложенных напряжений может быть достаточно для хрупкого раскрытия трещины.

Обратимое влияние окружающей среды.

Это явление связано с протеканием обратимых физико-химических процессов, приводящих к понижению свободной поверхностной энергии металла. Такие эффекты, как правило, способствуют заметному изменению самих механических свойств материала. Понижение прочности, облегчение деформации и разрушения металлов вследствие обратимого физико-химическо-

го воздействия среды называется *эффектом Ребиндера*. Практически важная форма проявления *эффекта Ребиндера* - *пластифицирование*, то есть уменьшение предела текучести и коэффициента упрочнения при деформировании. Пластифицирующее влияние органических поверхностно-активных сред используют при обработке металлов давлением - вытяжке, прокатке, штамповке, волочении. Широко применяются поверхностно-активные вещества для облегчения деформации высокопрочных и труднообрабатываемых материалов. Другой формой проявления эффекта Ребиндера является возникновение хрупкости - резкое снижение прочности и пластичности. Данное воздействие обычно оказывают жидкие среды, родственные с данным материалом по химическому составу и структуре. Для металлов таковыми являются определенные жидкие металлы. Например, латунь и цинк становятся хрупкими в присутствии ртути, медь - в расплаве висмута. Для проявления эффекта Ребиндера необходимо не только контактирование металла с жидкой (или газообразной) адсорбционно-активной средой. Важным условием является также наличие в объекте растягивающих напряжений.

Понимание сущности процессов, выявление, анализ и синтез диагностических признаков изменений, происходящих как в самом металле, так и на его поверхности в результате контактного взаимодействия с различными средами, основные виды которого рассмотрены в данной работе, позволяют устанавливать характер, механизм и причины эксплуатационных разрушений металлических конструкций, изделий, отдельных деталей.

Список литературы

1. Иванова В.С. Разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1979, 167 с.
2. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов.- М.: Металлургия, 1984. 280 с.
3. Костецкий Б.И. и др. Поверхностная прочность материалов при трении. - Киев: Техника, 1976, 292 с.
4. Галега Н.Л. Схватывание в машинах и методы его устранения. - Киев: Техника, 1965, 231 с.
5. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. - М.: Металлургия, 1972, 189 с.