**РЕФЕРАТ**

**ИЗНОС ПРИ ТРЕНИИ**

Недопустимые процессы катастрофического износа и повреждаемости при трении связаны, главным образом, с явлениями схватывания, возникающими при нарушении условий динамического равновесия образования и разрушения окисных пленок.

В процессе внешнего трения происходит трансформация внешней механической работы в энергию внутренних процессов. Установлено, что при внешнем трении изменяются свойства поверхностных слоев материалов. Происходят структурные превращения, увеличивается сопротивление деформации и твердость, возрастает электрическое сопротивление, усиливаются диффузионные процессы, образуется теплота и т.п.

Основное принципиальное положение теории внешнего трения можно описать зависимостью:

 (1)

из которой следует, что работа внешнего трения ***А*** расходуется на образование теплоты ***Q*** и поглощение энергии ***ΔЕ***.

Величина ***ΔЕ*** представляет собой общее увеличение теплосодержания узла трения, причем известно, что в основном эта энергия поглощается металлом. Работа внешнего трения никогда полностью не переходит в теплоту, в связи с чем ***ΔЕ*** никогда не равна нулю. Вполне очевидно, что разрушение поверхностного слоя в большой степени зависит от величины ***ΔЕ***, и состояние контакта в процессе трения можно характеризовать зависимостью

, (2)

где ***φ*** - некоторый оператор.

На рис. 1 и 2 изображены принципиальные схемы, описывающие возможные энергетические соотношения в диапазоне изменения нормальной нагрузки на контакт и скорости скольжения контактирующих поверхностей.

Участок **I** характеризует переходную область, в которой при малых значениях ***N*** или ***v*** еще нет условий для полной нормализации процесса трения. Здесь нагрузки еще недостаточны для предельного измельчения, упрочнения и ориентации, то есть нет необходимых условий для приспосабливаемости материалов, отношение ***ΔЕ/А*** стремится к минимуму.

Участок **II** характеризует нормальное внешнее трение. Интенсивность процессов трансформации и разрушения поверхности минимальны. Режим обеспечивается протеканием на границе раздела материалов в тончайших поверхностных слоях строго определенных механохимических процессов. Пластическая деформация обеспечивает измельчение и ориентацию структуры, отношение ***ΔЕ/А*** минимально. Поглощенная энергия затрачивается на измельчение, ориентацию и активизацию структуры поверхностных слоев. Основная часть работы превращается в теплоту (***А*** ~ ***Q***). Для этой области соблюдается линейная зависимость коэффициента трения от нагрузки типа эмпирического закона Кулона.

Дальнейшее увеличение давления или скорости (участок **III**) вызывает нарушение стабильности количественных характеристик процесса без существенных изменений природы контакта. Деформация и разрушение защитных вторичных структур происходит более интенсивно, толщина текстурируемого слоя превышает критическое значение, возникают процессы распада метастабильных структур и т.д. Зависимость коэффициента трения от интенсивности нагрузки отклоняется от линейной. Отношение ***ΔЕ/А*** стремится к максимальному критическому значению.

При дальнейшем увеличении интенсивности нагрузки величина ***ΔЕ*** достигает критического значения, происходит качественное изменение процесса трения, свойств поверхностных слоев и вида поверхностных связей. Конечным результатом является возникновение патологических режимов трения, возникают условия, способствующие повреждаемости поверхности, возникновению патологических явлений, возможны схватывание, смятие, внедрение, пропахивание и т.п. (участок **IY**).

Сопротивление всякого физического тела действию внешних сил сопровождается его деформацией. Деформация является основным процессом, обусловливающим протекание внешнего трения. Она приводит к изменению площади фактического контакта, развитию физического рельефа, вызывает ряд производных явлений, оказывающих решающее влияние на формирование сил трения и разрушение поверхностных слоев - износ и повреждаемость.

При трении без повреждаемости поверхностей можно выделить две зоны с резко различным напряженно деформируемым состоянием. Первая зона - зона упругопластических деформаций, вторая - упругих деформаций (рис. 3).

Процессы разрушения локализованы в первой зоне, процессы образования теплоты - в обеих. При разных условиях трения в зоне упругопластических деформаций могут происходить разные явления - от упрочнения с увеличением предела текучести до разрушения.

В первом случае, который относится к процессу нормального трения, в поверхностном слое образуются псевдоаморфные пленки, устойчивость которых обеспечивается за счет диффузии из окружающей газовой или смазочной среды различных элементов, особенно окислителей: кислорода, серы, фосфора и др. В результате образуются упорядоченные области вторичных структур (рис. 4), размеры которых составляют 1,5-5 нм и зависят от условий трения. При этом в некоторых случаях прочность аморфизированных гомогенных пленок приближается к теоретической прочности металла, а их толщина составляет около 10-100 нм.

Во втором случае при нарушении нормального процесса трения возникают явления схватывания, механические повреждения поверхности (пропахивание, царапанье, резание и др.), усталостные явления. Проявляются все признаки объемной пластической деформации разрушения, распространяющейся на глубину порядка сотен микрометров (рис 5).

В некоторых случаях в контакте возникают температуры, вызывающие фазовые превращения, отпуск и т.п. Процессы повреждаемости ведут, как правило, к полной потере поверхностной прочности, что недопустимо.

При патологических условиях трения все характеристики контакта (геометрические, физико-химические) резко изменяются. Различия существенны не только при сопоставлении нормального трения с патологическим, но и для различных форм повреждаемости.

Таким образом, при внешнем трении можно выделить с геометрической точки зрения два процесса - *изнашивание* и *повреждаемость*.

**Изнашивание** - это процесс постепенного изменения размеров деталей, происходящий при трении. Различают линейный износ, определяемый по изменению размера, и объемный, измеряемый по объему отделившегося материала. При диагностике изношенной детали и определению возможности ее дальнейшей эксплуатации основное значение имеет линейный износ.

**Повреждаемость** - процесс резкого изменения геометрических размеров поверхности трения, структуры и свойств поверхностных слоев.

Зависимость величины износа от скорости относительного перемещения всегда содержит такой участок, когда скорость износа примерно постоянна и минимальна (рис. 6). Вне этого участка скорость износа увеличивается. При нормальной эксплуатации автомобиля узлы трения работают исключительно в стационарной области, хотя, как показывает практика, вероятность нарушения нормальных условий достаточно велика. При этом возникают различные аварийные процессы: схватывание I и II рода, микрорезание, усталостное разрушение, фреттинг-процесс и т.д.

Стационарная область всегда связана с определенным видом трансформирования и разрушения поверхностей трения, что определяется динамическим равновесием процессов образования и разрушения вторичных структур. В обычных условиях - это механохимический процесс окислительного износа, при котором не разрушается основной материал, а разрушения происходят только в тончайшем слое вторичных структур, которые тут же восстанавливаются, обеспечивая установившееся протекание процесса.

Все патологические виды повреждаемости поверхностей при трении можно разделить на две группы:

1. Процессы, вызываемые нарушением динамического равновесия, характеризующего нормальный окислительный износ. Это силовые (схватывание I рода) и тепловые (схватывание II рода) перегрузки, динамический характер нагружения (фреттинг-процесс), резкая локализация напряжений (механохимическая форма абразивного износа).
2. Процессы, вызванные специфическими условиями нагружения: усталостные повреждения, резание, пропахивание, смятие и специфические виды повреждаемости - коррозия, электрокоррозия, кавитация и т.п.

**Окислительный износ**

Окислительное изнашивание - это процесс постепенного разрушения поверхностей деталей, вызываемый взаимодействием активных, пластически деформируемых поверхностных слоев металла с атомами кислорода, который содержится в воздухе или в смазке и адсорбируется на поверхностях трения. При этом образуются химически адсорбированные пленки, пленки твердых растворов и химических соединений металла с кислородом и удаление их с поверхностей трения. Это установившийся стационарный процесс динамического равновесия разрушения и восстановления окисных пленок.

На деталях этот вид износа наблюдается как поверхности (например, полоски) темного цвета (рис. 7).

Деформационные и окислительные процессы при этом виде износа происходят в очень тонких поверхностных слоях порядка 10-100 нм.

Окислительный износ имеет несколько форм проявления в зависимости от вида трения, скорости относительного перемещения, нагрузки, динамичности ее приложения, температуры, среды и т.д. Условно этот вид износа можно разделить на две формы (табл. 1, рис. 8). Форма I характеризуется образованием на поверхностях трения твердых растворов кислорода и тонких эвтектик его соединения с металлом. Форма II - образованием химических соединений кислорода с металлом (для стали - FeO, Fe2O3, Fe3O4).

При наличии абразивной среды окисление и разрушение интенсифицируются вследствие большой концентрации напряжений в локальных объемах металла.

В условиях динамического нагружения при наличии ударов и вибраций окисление интенсифицируется в результате резкой активизации пластически деформируемого металла (фреттинг-процесс).

Удельные давления при окислительном износе не превышают критических значений разрушения масляной пленки, или величин, при которых наступает интенсивное разрушение защитных вторичных структур.

Таблица 1

Характеристики состояния поверхности и поверхностных слоев стали при окислительном износе

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Критерии оценки процесса | Форма окислительного износа | |
|  | I | II |
| Класс чистоты | 10-14 | 9-13 |
| Глубина разрушающегося слоя | 10-30 нм | 10-100 нм |
| Температура поверхностного слоя | До 100 ОС | До 200 ОС |
| Изменения химического и фазового состава поверхностного слоя | Образование твердых растворов и эвтектик | Образование окислов и эвтектик |
| Увеличение твердости поверхностного слоя по сравнению с исходным | 2-3 раза | 4-5 раз |
| Разрушение поверхностного слоя | Вязкое | Вязко-хрупкое |
| Скорость процесса изнашивания | До 0,1 мкм/час | До 0,05 мкм/час |
| Сопутствующие процессы | Нет | Механическое повреждение абразивными частицами |

Наряду с окислительным существует ряд разновидностей механохимического износа, отличающихся образованием в процессе трения сульфидных, фосфидных и других видов пленок вторичных структур, выполняющих ту же роль, что и пленки окислов. Перспективы расширения класса таких разновидностей износа чрезвычайно велики.

**Износ и повреждаемость при наличии абразивной среды**

Этот вид износа наблюдается в сопряжениях широкого круга машин, и особенно при их работе в запыленной среде вследствие проникновения твердых частиц с воздухом, смазкой, горючими материалами, после обработки пар трения абразивным инструментом при плохом удалении остатков абразива. Кроме того, этот вид износа также обусловлен образованием в парах трения продуктов износа, которые играют роль абразива.

Формы и механизмы разрушения определяются взаимодействием поверхностей трения с абразивной средой. Существуют две четко выраженные формы проявления абразивных процессов (рис. 9):

1. С преобладанием механохимического разрушения (пластическое деформирование поверхности, окисление и последующее разрушение образующихся пленок).
2. С преобладанием механического разрушения поверхностного слоя (внедрение абразивных частиц и разрушение поверхностных объемов со снятием микростружки или без отделения объема основного металла).

При абразивном износе происходит явное искажение формы контактирующих поверхностей, на цилиндрических деталях хорошо видны круговые канавки различного профиля. Глубина разрушающегося слоя при I-й форме составляет до 200 нм с упрочнением поверхностного слоя в 2-3 раза, при II-й форме - до 0,2 мм с упрочнением поверхностного слоя в 1,5 раза. В первом случае скорость процесса разрушения достигает 0,5 мкм/ч, во втором - до 50 мкм/ч. При отношении твердости металла к твердости абразива более 0,6 возникает механохимическая форма износа, в противном случае - механическая форма, то есть повреждаемость.

**Схватывание I рода**

Это процесс недопустимой повреждаемости поверхностей трения, развивающийся в результате возникновения локальных металлических связей, их деформации и разрушения с отделением частиц металла или налипанием на поверхность контакта (рис. 10).

Возникновение металлических связей происходит при интенсивной деформации поверхностных объемов металла, обусловленной атермической пластичностью.

При схватывании I рода поверхность имеет 3-4-й классы чистоты, глубина разрушающегося слоя достигает 0,5 мм. Изменений химического и фазового состава поверхностного слоя не происходит, т.к. температура поверхности не превышает 100 ОС. Поверхностный слой упрочняется в 1,5-2 раза по сравнению с исходным, в нем возникают напряжения сжатия. Разрушения носят вязко-хрупкий характер и происходят со скоростью до 10-15 мкм/ч, сопутствующий процесс - низкотемпературное окисление.

Схватывание I рода возникает при небольшой скорости относительного перемещения поверхностей и при удельных давлениях, превышающих предел текучести на участках фактического контакта при отсутствии разделяющего слоя смазки и защитной пленки окислов.

Это один из наиболее опасных и резко выраженных видов повреждения деталей машин, который недопустим в процессе эксплуатации автомобиля. Для его предотвращения необходимы сведения о реальных нагрузках контактирующих поверхностей и условиях их работы. Особо опасны проявления атермического схватывания при динамическом нагружении и развитии фреттинг-процесса.

**Схватывание II рода**

Это процесс недопустимой повреждаемости поверхности трения, вызванный образованием местных металлических связей, их деформацией и разрушением, выражающимся в образовании трещин, намазывании, переносе металла и отделением частиц с поверхностей трения. В этом случае происходит выделение теплоты выше значений, допустимых для данных материалов, возникают металлические связи, обусловленные размягчением, деформацией, и контактированием поверхностей. При этом поверхности сближаются на расстояния, близкие к межатомным радиусам.

Схватывание II рода возникает при трении скольжения с большой скоростью относительного перемещения контактирующих поверхностей и значительном удельном давлении. При этом возникают высокие температуры поверхностей, до 1500 ОС, и термическая пластичность металла, вызывающая разупрочнение металла, явления отпуска и оплавления. Происходит рекристаллизация, отпуск, закалка и вторичная закалка.

Схватывание II рода может проявляться при сухом трении и граничной смазке (во втором случае оно происходит при более высоких скорости скольжения и давлении). Его появление в большой мере зависит, при прочих равных условиях, от свойств трущихся материалов, их теплоустойчивости, теплоемкости, теплопроводности. К нему склонны закаленные стали с резко выраженным переходом к термической пластичности.

Чистота поверхности, подвергшейся схватыванию II рода, соответствует 5-6-му классу, глубина разрушающегося слоя - до 0,1 мм. Если повреждение сопровождается закалкой поверхностного слоя, то его твердость повышается в 1,5-2 раза, если происходит отпуск, то твердость снижается в 3-4 раза. Разрушение поверхностного слоя вязкое с особым проявлением ползучести, его скорость - 1-5 мкм/ч, сопутствующий процесс - высокотемпературное окисление.

Визуально по сравнению со схватыванием I рода наблюдается более высокий класс чистоты поверхности, сама поверхность может иметь цвета побежалости и сравнительно большие по площади дефекты малой глубины.

На практике схватывание II рода возникает чаще всего в сопряжениях с устойчивой граничной смазкой в том случае, когда прекращается регулярный подвод смазки.

**Усталостные повреждения**

Возникают в деталях машин в основном при трении качения и являются результатом интенсивного разрушения поверхностных слоев металла, находящихся в особых условиях напряженного состояния.

Развитие усталостных повреждений определяется процессами повторной пластической деформации, последовательно происходящими упрочнением и разупрочнением металла поверхностных слоев, возникновением остаточных напряжений и особыми явлениями усталости.

Разрушение поверхностей при усталостных повреждениях характеризуется возникновением микротрещин, единичных и групповых впадин (рис. 11).

Геометрия поверхности при усталостных разрушениях характеризуется локальными макроскопическими изменениями, глубина разрушающегося слоя достигает 5 мм, температура поверхности не превышает, как правило, 100 ОС, изменения химического и фазового состава поверхностного слоя не происходит, его твердость может повышаться в 1,5-2 раза. В поверхностном слое наблюдаются напряжения сжатия, основная причина его разрушения - особые проявления малоциклической усталости, сопутствующий процесс - окисление. Часто процесс износа при трении качения называют питтингом.

**Фреттинг-процесс**

Это разрушение поверхностного слоя, проявляющееся в резко интенсифицированном (динамическом) окислении или схватывании. Окисление при фреттинг-процессе носит специфический характер, необычный для нормального трения, и протекает очень интенсивно. Процесс схватывания также резко выражен и наблюдается при относительно малых давлениях в контакте. Эти явления обусловлены динамическим характером нагружения, при котором в контакте резко увеличивается градиент деформаций и температур.

При внешнем осмотре поверхность детали, пораженная фреттинг-процессом, выглядит как бы изъеденной (рис. 12), с многочисленными кавернами различной площади неправильной формы. При наличии преимущественно явления схватывания глубина каверн достигает 0,5 мм, в случае преимущественно динамического окисления - 0,2 мм.

Фреттинг-процесс возникает при трении скольжения с очень малыми возвратно-поступательными перемещениями и динамическом приложении нагрузки. Существует минимальная величина скольжения, при которой фреттинг-процесс не возникает. Этому виду разрушения подвержены различные материалы, он возможен как в условиях сухого трения, так и в условиях смазки.

трение износ повреждение поверхность

Температура поверхностных слоев при схватывании достигает 200 ОС, при динамическом окислении - до 300 ОС. В первом случае упрочнение поверхностного слоя находится в пределах 1,5-2, во втором - 3-8. Скорость разрушения поверхностного слоя в обоих случаях около 5 мкм/ч (при схватывании может достигать 10 мкм/ч).

Фреттинг-процесс представляет собой один из весьма опасных и резко выраженных видов повреждений, в связи с чем необходимо тщательно анализировать причины его возникновения и принимать меры к их исключению.

**Износ** любого вида обычно характеризуют линейной интенсивностью изнашивания:

 (3)

где ***U*** - изменение линейного размера, ***L*** - путь, на котором произошло это изменение. Таким образом, величина ***I*** является безразмерной и измеряется в мм/(мм пути).

Для нормально изнашивающихся пар трения автомобилей эта величина составляет от 10-9 до 10-12. Например, у шатунных шеек коленчатого вала износ составляет от 4·10-11 до 5·10-12, у коренных шеек от 1,6·10-11 до 1,8·10-12, у хромированных поршневых колец около 3·10-12, у внутренней поверхности чугунных гильз дизеля - (1,1-5,6)·10-11, у шеек поворотной цапфы ходовой части автомобиля ЗИЛ-130 - 1,6·10-9, у бронзовых букс амортизаторов - 2·10-11.

Износ заметно выше в трущихся парах, подверженных фреттинг-износу. Так, например, в соединениях, подверженных вибрациям, он составляет около 10-6-·10-8 мм/(мм пути).

**Список литературы**

1.Бать М.И и др. Теоретическая механика в примерах и задачах. Учеб. пособ. для вузов. В 2-х т./М.И.Бать, Г.Ю.Джанелидзе, А.С. Кельзон.-9-е изд., перераб. - М.: Наука, 2007.-670 с.

.Бутенин Н.В. и др. Курс теоретической механики: Учеб.пособие для студ-ов вузов по техн. спец.:В 2-х т./ Н.В.Бутенин, Я.Л.Лунц, Д.Р.Меркин. СПб.:Лань.-5-е изд., испр. 2008.-729 с.

.Мещерский И.В. Задачи по теоретической механике: Учеб. пособие для студ. вузов, обуч.по техн. спец./И.В.Мещерский; Под ред.В.А.Пальмова,Д.Д.Меркина.-45-е изд., стер.- СПб. и др.: Лань, 2009.-447 с. 2.

.Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов/С.М.Тарг.-15-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2008.-415 с.

.Сборник заданий для курсовых работ по теоретической механике: Учеб. пособие для студ.втузов/[А.А. Яблонский, С. С.Норейко,С.А.Вольфсон и др.];Под общ. ред. А. А. Яблонского.- 11-е изд.,стер.-М.:Интеграл- Пресс,2008.-382 с.

.Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов/С.М.Тарг.-15-е изд.,стер.-М.:Высш.шк.,2007.-415 с.

.Теоретическая механика. Терминология. Буквенные обозначения величин: Сборник рекомендуемых терминов. Вып. 102. М.: Наука, 2007. - 48с.

.Яблонский А.А., В.М.Никифорова Курс теоретической механики. Учеб.пособие для вузов: 13-е изд., исправ.-М.: Интеграл-Пресс,2009.-603с