7. ИЗНОС И ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПРИ ТРЕНИИ В МАШИНАХ

7.1. Трибологические отказы

Трибология – это наука, изучающая процессы изнашивания с учетом свойств материалов и смазки [Кубарев, с. 78].

Основной причиной разрушения поверхностей деталей является внешнее трение. Вредные проявления этого явления выражаются в износе, повреждаемости поверхностей контакта, потерях мощности, нагреве и т. д. Полезное трение используется в фрикционных устройствах при передаче движения (муфты и тормоза).

Под трением понимается явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательной к ним [Кубарев, с.79].

При анализе механических систем необходимо различать следующие виды трения по наличию и характеру движения.

По кинематике движения трение делится на трение скольжения (трение I рода) и трение качения (трение II рода). По динамическим условиям контакта различают трение покоя и трение движения. По участию смазки различают жидкостное, граничное (полужидкостное или полусухое) и сухое трение.

Трение является результатом сочетания различных видов взаимодействия механических, физических химических, электрических и других процессов, возникающих при контакте и относительном перемещении тел [Костецкий, с. 21].

Трение обусловливается рядом причин: природой материалов, протяженностью поверхности контакта, давлением, продолжительностью и скоростью контакта.

Двойственная природа трения выражается законом Кулона

$$F = A + \mu N, \tag{3.1}$$

где F – сила трения;

A – константа, характеризующая способность трущихся тел к взаимному сцеплению;

μ – коэффициент трения;

N – нормальная сила реакции.

Исследования процессов изнашивания показывают, что вид разрушения, его границы и интенсивность протекания при установившемся режиме работы машины определяется тремя группами факторов:

- внешними механическими воздействиями на поверхность трения;
- внешней средой;
- свойствами поверхностей трения.

7.2. Зависимость коэффициента трения от условий работы узла

Внешние механические воздействия на поверхность трения определяются величиной скорости относительного скольжения, значением нормального

давления на поверхности, величиной коэффициента трения и другими факторами [костя с. 35 Костя см с. 56].

Величина коэффициента трения определяет значение силы трения, и как следствие, работы трения.

В общем случае величина коэффициента трения зависит от нормального давления и скорости скольжения (рис. 3.1 и рис. 3.2).

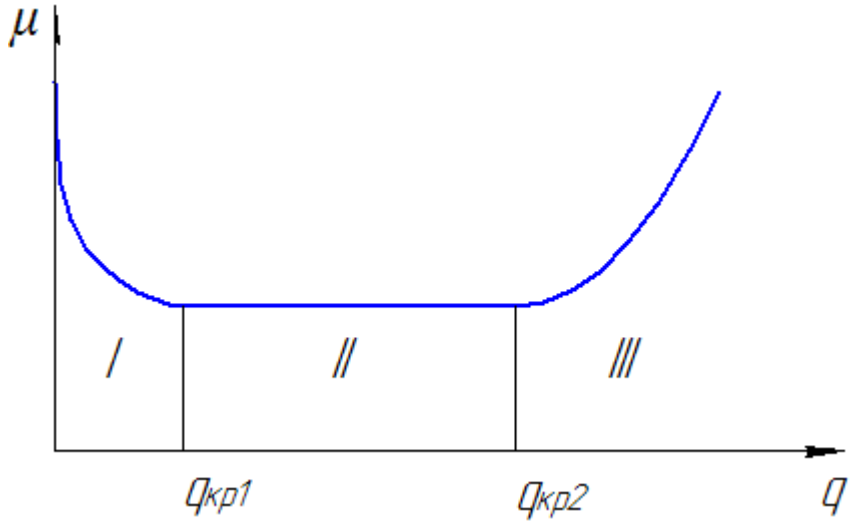

Рис. 3.1 – Зависимость коэффициента трения от нормального давления

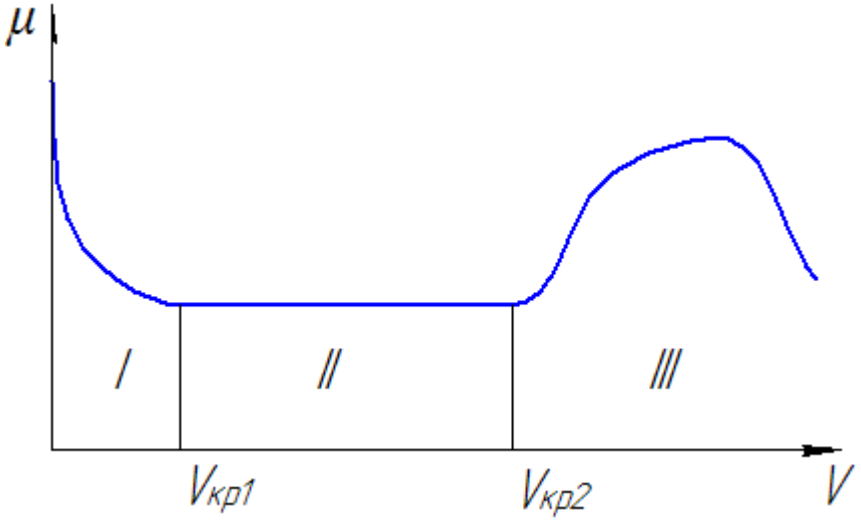

Рис. 3.2 – Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения

Зависимость коэффициента трения от нормального давления имеет три характерных участка. Нормальный режим (участок *II*) определяется стабильным устойчивым коэффициентом трения и минимальным (допустимым) износом. На участке возникновения патологических процессов (участок *III*) резко начинаются процессы схватывания, смятия и другие явления, приводящие к большим колебаниям коэффициента трения, интенсивному износу и, в результате, к быстрому переходу к аварийному состоянию.

Зависимость коэффициента трения от скорости также имеет три участка.

7.3. Классификация износа и повреждаемости при трении

Изнашивание поверхностей классифицируется на следующие виды.

- Механическое – абразивное, гидроабразивное, эрозионное, гидроэрозионное, кавитационное, изнашивание при фретинге;
- Коррозионно-механическое – окислительное, изнашивание при фретинг-коррозии, электроэрозионное.

В процессе изнашивания на поверхностях деталей происходят явления [Кубарев, с. 78]:

- Схватывание при трении – явление местного соединения двух твердых тел, происходящее под действием молекулярных сил трения;
- Перенос материала – явление, состоящее в том, что материал одного тела соединяется с другим и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго;
- Заедание – процесс возникновения и развития повреждений поверхностей вследствие схватывания и переноса материала;
- Задир и царапание – повреждение поверхностей в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения;
- Отслаивание – процесс отделения с поверхности материала в форму чешуек при усталостном изнашивании;
- Выкрашивание – процесс образования ямок на поверхности трения в результате отделения материала.

Механическое изнашивание происходит только в результате механических воздействий. В большинстве случаев начиная с момента приработки изнашивание начинается с пластического деформирования (расплющивания) выступов. За счет многократного пластического деформирования изменяется форма поверхности, геометрический профиль выравнивается и как бы выглаживается. Выступы микронеровностей наклепываются, твердость материала в зоне контакта возрастает. После упругого изнашивания, когда происходит только упругое деформирование микронеровностей, может наступить микрорезание, когда контактные напряжения достигают разрушающих значений и начинается разрушение поверхности одного тела микровыступами второго.

Абразивное изнашивание – механическое изнашивание в результате режущего или иного действия твердых тел между контактирующими телами. Такими телами (размером 1 – 30 мкм и более) могут быть продукты износа, остатки окисных пленок, окалина и абразивная пыль в окружающей среде. Посторонние абразивные частицы могут быть закреплены на поверхностях тел, свободно перемещаться со смазкой в зазоре. В последнем случае имеет место гидроабразивное или газоабразивное изнашивание. Абразивные частицы производят в основном царапающее действие, особенно при различной твердости контактирующих тел.

Эрозионное изнашивание состоит в одновременном действии механического трения и ударов высокоскоростного потока жидкости или газа. Такое изнашивание наблюдается в клапанах, золотниках, форсунках, поршневых кольцах и др.

Эрозионное изнашивание сопровождается абразивным износом частицами, присутствующими в жидкости или газе.

Кавитационное изнашивание имеет место при относительном движении твердого тела в жидкости в условиях кавитации. Кавитация происходит на поверхности изделия, обтекаемого жидкостью при резком изменении давления, в результате чего происходит парообразование с резким ростом давления в месте образования газовых пузырей. Обычно это происходит на поверхностях гребных валов, лопаток турбин, колесах насосов и т. п.

В результате процесса изнашивания происходит износ поверхностей. Максимальное значение износа, при котором изделие сохраняет работоспособность, называется ***допустимым износом***. При достижении определенной величины износа, называемого ***предельным***, наступает отказ или предельное состояние объекта, после которого становится невозможным или нецелесообразным дальнейшее его использование.

Наработка до отказа из-за износа определяется по величине скорости или интенсивности изнашивания.

7.4. Зависимость износа от скорости скольжения и нормального давления

Для заданных материалов контактирующих тел интенсивность износа определяется, прежде всего, скоростью скольжения тел. В большинстве случаев зависимость износа от скорости скольжения имеет три характерных участка (рис. 3.3, *а*). Участок *I* соответствует интенсивному патологическому процессу схватывания *I* рода. На участке *II* в основном имеет место окислительный износ, развивающийся при нормальных условиях трения. На участке *III* имеет место значительная температурная перегрузка и происходят процессы схватывания *II* рода.

Схватывание *I* рода – процесс недопустимой повреждаемости поверхностей трения, развивающийся в результате возникновения локальных металлических связей, их деформации и разрушения с отделением частиц металла или налипанием на поверхности контакта. Процесс схватывания *I* рода представляет собой один из наиболее опасных и резко выраженных видов повреждения деталей машин. Процесс схватывания весьма существенно зависит от механических и физических свойств материалов и их сочетаний, предела прочности, твердости, типа кристаллических решеток взаимной растворимости и т. д. В практике работы деталей машин этот процесс крайне недопустим и его следует всячески избегать. Для его устранения необходимо точно учитывать влияние критической скорости скольжения, давления.

Схватывание *II* рода – процесс необратимой повреждаемости поверхностей, вызванный образованием местных металлических связей, их деформацией и разрушением, выражающемся в образовании трещин, намазывании, переносе металла и отдельных частиц с поверхностей. Возникновение этого схватывания обусловлено нагреванием и размягчением поверхностей контакта. Чаще всего такое повреждение имеет место при нарушении состояния устойчивой граничной смазки.

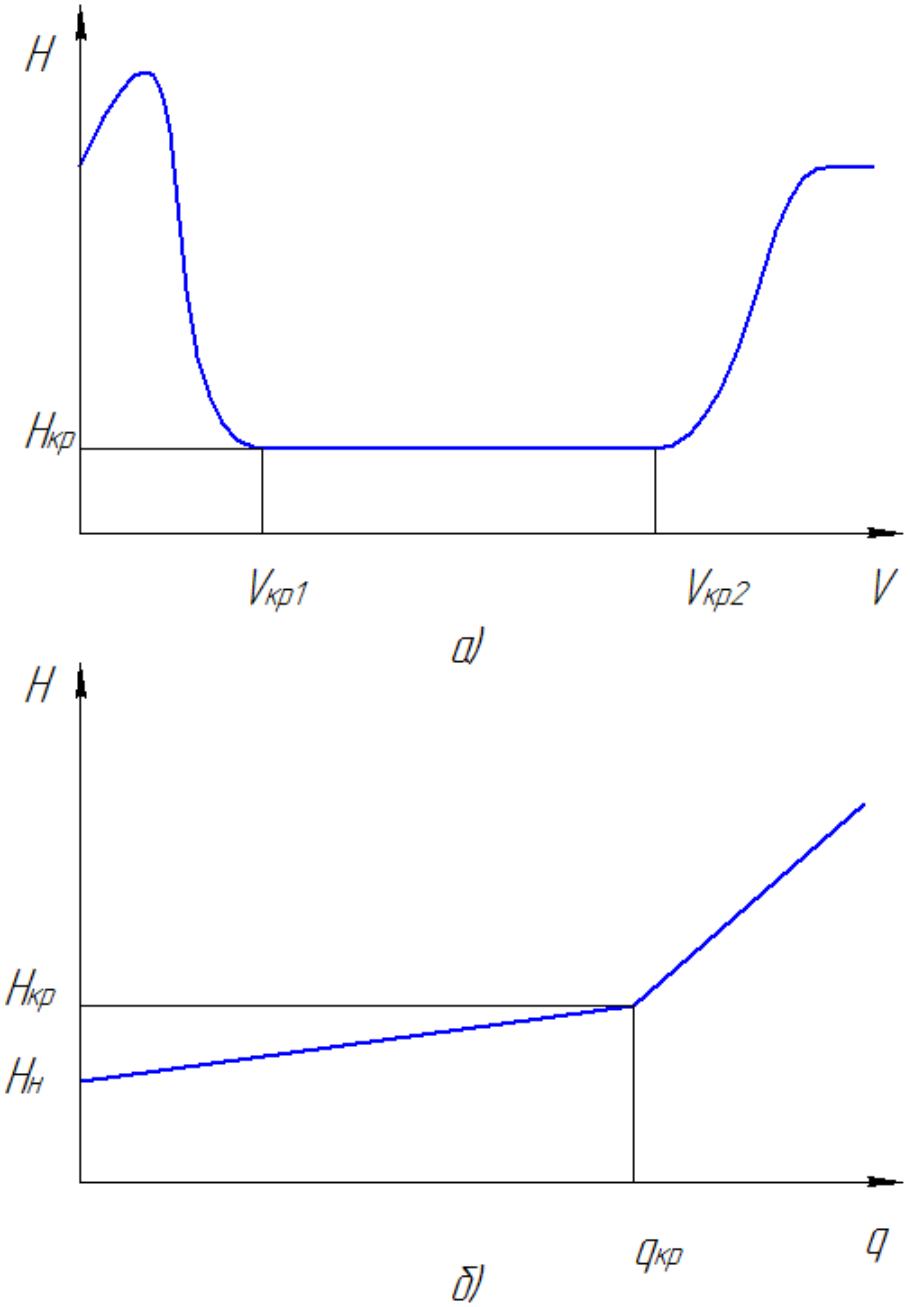

Рис. 3.3 – Зависимость износа от скорости скольжения и нормального давления

График зависимости износа от нормального давления имеет два характерных участка (рис. 3.3, *б*): *I* – стационарный, нормального механохимического износа; *II* – участок, соответствующий патологическим процессам повреждаемости в результате схватывания *I* и *II* рода.

8. КОРРОЗИОННОЕ И ЭРОЗИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

8.1. Отказы по параметрам коррозии

Коррозия – это разрушение металла вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой (жидкостями или газами). Под коррозионной надежностью понимается свойство изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров в условиях

взаимодействия с коррозионной средой. Коррозия может являться не только процессом безвозвратного повреждения деталей машин и их отказам, но и являться причиной ускоренного износа вследствие трения, усталостного разрушения, снижения механических свойств [Кубарев, с. 90, Костецкий с. 146].

Установлено, что около 30 % изделий, изготовленных из черных и цветных металлов и сплавов, выбывают из строя по причине коррозионного разрушения, причем треть из них безвозвратно.

Разнообразие условий эксплуатации машин, обилие факторов, влияющих на коррозионные процессы, обусловливают многообразие форм проявления коррозии.

Коррозионные разрушения классифицируются в зависимости от:

- Механизма протекания процесса:
  - ❖ Химическая коррозия;
  - ❖ Электрохимическая коррозия;
- Характера повреждения поверхности:
  - ❖ Сплошная (равномерная, неравномерная, избирательная);
  - ❖ Местная (пятнами, точками, межкристаллитная);
- Условия протекания процесса:
  - ❖ Газовая;
  - ❖ В неэлектролитах;
  - ❖ В электролитах;
  - ❖ Атмосферная;
  - ❖ Электрическая и др.

Химическая коррозия объединяет гамму процессов химического взаимодействия металлов с агрессивными средами различного состава. Наибольший практический интерес представляет процесс взаимодействия материалов с кислородом. Из-за большого сродства металлов к кислороду в первую очередь происходит адсорбция кислорода на поверхности детали. Молекулы кислорода диссоциируют на атомы, которые, закрепляясь на поверхности, начинают химические реакции с металлом по формуле

$$mMe + \frac{n}{2}O_2 \Leftrightarrow Me_mO_n, \tag{4.1}$$

где m – число атомов металла;

n – валентность (окислительное число) металла.

Образующаяся на поверхности детали пленка продуктов окисления может либо не препятствовать дальнейшему процессу окисления (окисление алюминия), либо тормозить ее. Если в процессе окисления в пленке возникают значительные внутренние напряжения, она разрушается и кислород получает доступ к следующим слоям металла. На поверхности металлов с переменной валентностью (медь, кобальт, железо и др.) имеющих разные степени окисления в зависимости от температуры и давления, могут возникать одно или многофазные толстые пленки, соответствующие различным степеням окисления (рис. 4.1).

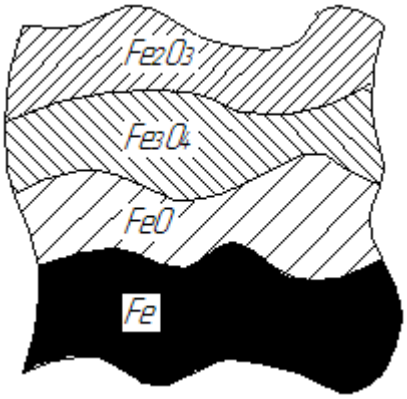

Рис. 4.1 – Схема толстой пленки при окислении железа

Электрохимическая коррозия – это взаимодействие металла с коррозионной средой (раствором электролитов), при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительной компоненты электролитической среды протекают не в одном акте и их скорости зависят от электродного потенциала.

Процессы электрохимической коррозии описываются законами электрохимической кинетики. При этом процессе протекают две группы реакций: анодная и катодная. Анодная реакция приводит к растворению атомов металла в электролите, катодная к восстановлению или металла или водорода.

8.2. Основные виды коррозии

Механизмы химической и электрохимической коррозии являются главными, определяющими закономерности разрушения деталей при их взаимодействии с окружающей средой.

В зависимости от конкретных условий эксплуатации коррозионное разрушение деталей может происходить либо по одному из вышеуказанных выше механизмов либо с преобладанием одного из них.

Наиболее распространенными являются следующие виды коррозии.

Газовая коррозия является частным случаем химической коррозии в активных газовых средах при повышеннных температурах (детали двигателей, химической аппаратуры и др.). Газовая коррозия зависит от состава газовой среды. Кроме кислорода наиболее сильными агрессивными свойствами обладают пары воды, углекислота, хлор, сероводород. Газовая среда обладает избирательной агрессивностью по отношению к разным металлам. Например, в среде сернистого газа низкую стойкость имеют железо, никель и кобальт. В тоже время медь имеет в этой среде высокую устойчивость.

Коррозия в неэлектролитах протекает также по химическому механизму при воздействии агрессивных органических веществ. Наиболее активными являются органические растворители (бензол, толуол, четыреххлористый углерод), жидкое топливо (мазут, керосин, бензин), смазочные вещества и др. Коррозии этого типа подвержены детали нефтедобывающей и перерабатывающей промышленности, корпуса танкеров, аппаратура химического производства. Коррозионная активность нефти и ее продуктов обусловлена наличием в их составе чистой серы и ее соединений (от 0,1 до 3…5 %).

Коррозия в электролитах возникает при контакте металлов с водой, водными растворами, обладающими электропроводностью. В зависимости от химического состава среды коррозия может быть кислотной, щелочной, солевой и морской.

Одной из самых распространенных является ***атмосферная коррозия***. На ее долю приходится более половины коррозионных потерь.

Различают сухую, влажную и мокрую атмосферную коррозию (рис.4.2).

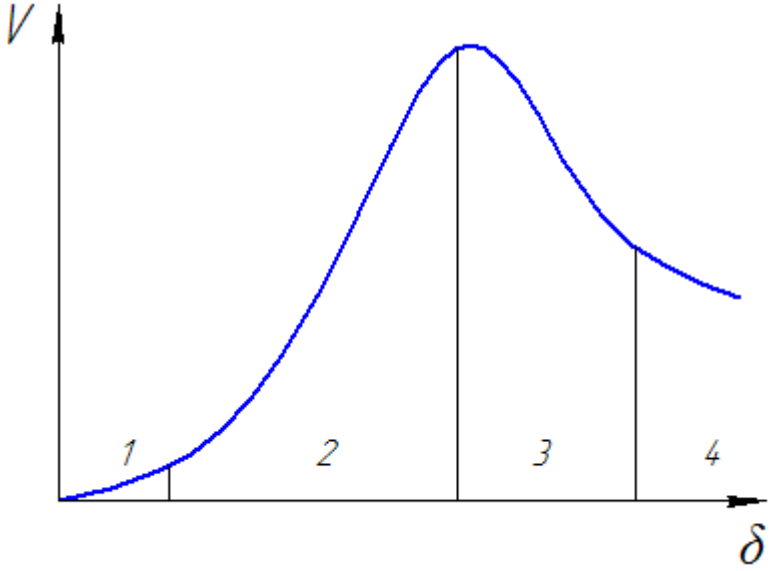

Рис. 4.2 – Зависимость скорости коррозии от толщины слоя влаги

Сухая коррозия (участок 1) имеет место при сухой поверхности деталей. На поверхности образуются тончайшие, невидимые глазом окисные пленки. Скорость коррозии при этом минимальная.

Влажная коррозия (участок 2) протекает под невидимым слоем влаги, образующимся в результате капиллярной, адсорбционной или ионной конденсации. Скорость достигает максимальных значений.

Мокрая коррозия (участок 3) наблюдается при капельной конденсации влаги и образования видимой пленки жидкости. Такие условия возникают при попадании на поверхности деталей дождя, снега 100 % влажности воздуха. Скорость коррозии несколько замедляется. Участок 4 соответствует условия коррозии при полном погружении деталей в электролит.

Скорость коррозии зависит от состава атмосферы, температуры и влажности.

Электрическая коррозия происходит с деталями, находящимися в зоне действия блуждающих токов, источниками который являются электрифицированные дороги, электропередачи системы «провод-земля», сварочные генераторы и др.

8.3. Виды эрозионного разрушения деталей машин

Под действием многократно повторяющихся ударов струи жидкости или газовых потоков происходит разрушение деталей вследствие эрозии. Примером является разрушение горных пород под действием воды и ветра.

Большинство видов эрозии приводит к преждевременному выходу деталей из строя. По этой причине стремятся либо полностью локализовать эрозию, либо привести процесс разрушения в менее интенсивную форму.

Виды эрозии классифицируются в зависимости от условий внешнего воздействия среды.

Различают четыре вида эрозии:

- ***Газовая*** – явление разрушения поверхности под действием механических и тепловых сил молекул газа;
- ***Кавитационная*** – разрушение поверхности в результате действия парогазовых пузырьков и капелек жидкости;
- ***Абразивная*** – вид повреждения под действием струи мелких абразивных частиц с повышенной твердостью;
- ***Электрическая*** – разрушение металла под действием электрического разряда.

8.4 Конструктивные методы борьбы с коррозионным разрушением

Методы защиты деталей от коррозии делятся на такие группы:

1. Оптимальное конструирование узлов и деталей, работающих в агрессивных средах;
2. Рациональный выбор материалов, стойких против коррозии;
3. Изоляция деталей от прямого воздействия среды за счет применения защитных покрытий;
4. Обработка среды с целью снижения ее активности;
5. Использование методов электрохимической защиты.

Оптимальное конструирование деталей и узлов:

- Избегать сочетания разнородных в электрохимическом отношении металлов;
- Избегать образования щелей, зазоров, застойных мест и др.;
- Обеспечивать плавность сечения, легкость обтекания поверхности.

Универсальных материалов, устойчивых при всех видах коррозии не существует. Для каждого случая используют специальные материалы, обычно высоколегированные стали (жаропрочные, жаростойкие, коррозионностойкие).