

# Прямоугольные электрические соединители

## Фреттинг-коррозия в электрических контактах

**Основной причиной выхода из строя электрических соединителей является износ покрытий рабочих поверхностей контактов. Установлено, что около 50% износа приходится на так называемый процесс фреттинг-износа. Этот процесс еще недостаточно изучен, поэтому его отрицательным последствиям уделяется необоснованно мало внимания. В статье представлены общие сведения о фреттинг-коррозии, рассмотрен механизм этого процесса и факторы, влияющие на его развитие. Предложены экспериментально-аналитические методы качественной оценки фреттинг-износа и основные способы защиты от этого процесса.**

Александр Сафонов  
Леонид Сафонов

edet@online.debryansk.ru

### Общие сведения

Ресурс работы многих контактных пар электрических соединителей ограничивается износом или разрушением контактирующих поверхностей и их покрытий в результате развития фреттинг-коррозии или фреттинг-износа, возникающих при колебательном относительном движении контактирующих поверхностей. Такое движение может быть вызвано вибрациями, возвратно-поступательными движениями с относительно малыми перемещениями, периодическим изгибом или скручиванием сопряженных деталей контактной пары и т. п. Наличие проскальзывания между сопряженными поверхностями контактов — необходимое условие возникновения фреттинг-износа. Вследствие интенсивного износа контактов и их покрытий контактная пара соединителя теряет конструктивные размеры и технические параметры. При фреттинг-коррозии значительно ухудшается качество контактирующих поверхностей, появляются повышенная шероховатость, каверны и поверхностные микротрещины, что приводит к существенному снижению усталостной прочности поверхностных слоев контактов.

Фреттинг-коррозия (от англ. fret — разъедать, подтачивать) по ГОСТ 5272 — коррозия при колебательном перемещении одной поверхности относительно другой в условиях воздействия коррозионной среды.

Изнашивание при фреттинг-коррозии (фреттинг-изнашивание) по ГОСТ 16429 — это коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных перемещениях. В случаях, когда контактируют благородные металлы (золото, серебро, платина, палладий и др.), а также когда трутся поверхности химически активных металлов в глубоком вакууме или в сухих инертных газах, пользуются термином фреттинг или фреттинг-износ.

Усталостное повреждение, непосредственно связанное с развитием фреттинг-коррозии, называют

фреттинг-усталостью. Иногда термином фреттинг обозначают собственно действие, заключающееся в колебательном относительном движении прижатых одна к другой деталей.

Фреттинг-коррозия является особой формой износа и по условиям возникновения и характеру проявления имеет следующие отличия от обычного износа при сочленении-расчленении:

- Вследствие малой амплитуды смещений удаление продуктов износа из зоны трения затруднено, и повреждения при фреттинг-коррозии сильно локализованы на площадках действительного контакта.
- Скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей отличается от традиционных скоростей при сочленении-расчленении. Так, при амплитуде скольжения 0,025 мм и частоте колебаний 30 Гц максимальная скорость равна 4,7 мм/с, а средняя скорость — 3 мм/с.
- Если при обычном трении скольжения присутствие кислорода может уменьшать износ, то в условиях фреттинг-коррозии кислород усугубляет повреждение и увеличивает износ контактирующих поверхностей. Продуктами фреттинг-коррозии металлов являются в основном их окислы.

Чаще всего фреттинг-коррозия развивается на участках поверхностей контактов, непосредственно соприкасающихся друг с другом под определенным усилием.

Повреждения от фреттинг-коррозии проявляются в виде натиров, налипаний металла покрытия, вырывов или раковин, часто заполненных порошкообразными продуктами коррозии, полосами канавок локального износа, а также поверхностных микротрещин. На поверхностях контактов, подверженных фреттингу, возникают схватывание, микрорезание, а также усталостное разрушение микроразрывов металла покрытия, сопровождающееся окислением и коррозией (усталостно-коррозионные процессы).

В зависимости от величины контактного давления, свойств металлов покрытия, состава окружающей среды, в которой эксплуатируются электрические соединители, один из перечисленных процессов может играть ведущую роль, а остальные сопутствующую. Первый диагностический признак фреттинг-коррозии — это появление на поверхностях трения окрашенных пятен, в которых сосредоточены спрессованные окислы.

Кроме изменений микро- и макрогеометрии контактирующих поверхностей контактов, ухудшения их внешнего вида, повреждения от фреттинга приводят к более серьезным последствиям, связанным с нарушением размерной точности, ухудшением электрических и других функциональных параметров электрических соединителей. При этом возможны две ситуации. Если продукты фреттинг-коррозии имеют некоторый выход из зоны контакта, то это ведет к потере заданного контактного давления, изменению электрических параметров и, что самое опасное, к снижению электропрочности соединителя — за счет попадания токопроводящих частиц в межконтактные промежутки и на изолятор соединителя. С другой стороны, если продукты фреттинг-коррозии не имеют свободного выхода из зоны контакта, то в контактных парах может возникнуть заедание и даже заклинивание, тем более, что объем образующихся коррозионных продуктов обычно больше объема металла, перешедшего в окислы. Эта ситуация особенно опасна, так как электрические соединители периодически должны расчлаиваться для проведения регламентных работ, а в некоторых случаях необходимо производить их экстренное расчленение.

### Испытания на фреттинг-коррозию

Экспериментальный опыт показывает, что испытания на изнашивание при фреттинг-коррозии возможно производить на конкретных контактных или специально изготовленных образцах.

В качестве критерия фреттингостойкости могут быть определены износ по массе ( $\Delta U_m$ ) или линейный износ ( $U$ ) и эти же характеристики, приведенные к единице пути трения контактов.

Средний линейный износ определяется профилографированием дорожки трения. Хотя указанные методы определяют картину общего повреждения, однако в отдельных случаях они могут оказаться недостаточно объективными. Так, например, глубокие язвы на небольшой площади контакта могут быть более опасными, чем неглубокие того же объема, и наоборот. Метод определения износа по массе малоэффективен при небольших износах, тем более, что возможен взаимный перенос материала покрытия с одной контактной поверхности на другую. Степень повреждения от фреттинг-коррозии можно оценивать также произведением суммы площадей повреждений на их глубину.

Перед испытанием образцы должны быть тщательно протерты и обезжирены. Обычно

окислы с поверхностей трения удаляются механическим способом или следующими растворами:

- Раствор № 1 (на 100 мл раствора в воде): гидрохинон 4 г, ортофосфорная кислота концентрированная 22 мл, спирт 20 мл.
- Раствор № 2 (консистентный): жидкое стекло 70 мл (плотность 1,2–1,25), соляная кислота 100 мл. Жидкое стекло добавляют в соляную кислоту, перед применением смесь выдерживается 24 часа.

### Факторы, влияющие на развитие фреттинг-коррозии

Уточним характер взаимодействия контактов при трении. Взаимодействие контактов при трении сосредотачивается в некотором объеме материала, наделенном упруго-вязкими свойствами, ограниченном определенными толщинами покрытий. Этот объем может рассматриваться как так называемое «третье тело».

При взаимном перемещении контактов происходит разрушение и одновременно формирование «третьего тела». Фрикционный контакт, как правило, характеризуется наличием между твердыми телами промежуточного слоя, представляющего собой пленку (смазки) окисла, адсорбированных паров воды, пленку деградированного материала (основы) покрытия. Область, состоящую из пленки и деградированного материала покрытия, называют «третьим телом».

«Третье тело» должно иметь меньшее сдвиговое сопротивление, чем основные металлы покрытия контактов, в этом случае будет меньше трение и износ контактируемых поверхностей.

Схематический разрез контакта двух тел можно представить следующим образом (рис. 1).

«Третье тело» состоит из нескольких слоев. Внешний слой представляет собой граничную пленку смазки, адсорбированную или хемосорбированную. Толщина этой пленки может изменяться от порядка нескольких десятков до сотен Å.

При росте температуры адсорбированная пленка разрушается, а хемосорбированная формируется.

Под этой пленкой обычно располагается пленка окисла металла или другого химического соединения — сульфида, хлорида, фосфата, и, наконец, под этой пленкой лежит тонкий слой разрыхленного материала покрытия.

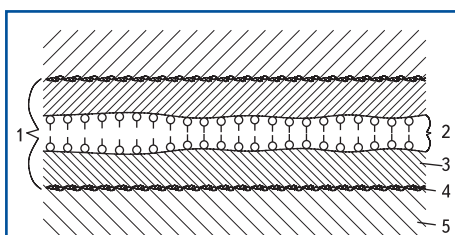


Рис. 1. Схема контакта двух тел:

- 1 — «третье тело»; 2 — адсорбированный слой;
- 3 — окислы и другие химические соединения;
- 4 — разрыхленный слой;
- 5 — основной материал покрытия

При скольжении единичные фрикционные связи, составляющие «третье тело», непрерывно сменяют одна другую: одни нарушаются, а другие образуются вновь. Следует отметить, что одна микрообласть поверхности может многократно участвовать в образовании фрикционных связей. В конце концов, поверхностный слой покрытия разрушается, образуя частицы износа.

Интенсивность изнашивания контактирующих поверхностей при фреттинг-коррозии зависит от многих факторов и в первую очередь от механических параметров контактного взаимодействия, природы контактирующих материалов и характера внешней среды.

### Амплитуда

#### относительного скольжения

Относительное скольжение контактирующих поверхностей электрических контактов является необходимым условием возникновения фреттинга. Очень малая амплитуда скольжения ( $8 \times 10^{-7}$  мм) уже считается достаточной для инициирования начала процесса фреттинг-коррозии. По мере увеличения амплитуды относительного проскальзывания контактов процессы, развивающиеся при контактном трении колебательного характера, все больше становятся похожи на обычный износ.

Величина износа при фреттинг-коррозии обычно прямо пропорциональна амплитуде скольжения, однако в ряде случаев наблюдается и параболическая зависимость.

При очень малых амплитудах относительного скольжения имеет место трение качения, так как в этих условиях частицы окислов могут играть роль подшипников, что затрудняет возникновение очагов схватывания. Закон изменения износа в зависимости от амплитуды скольжения неодинаков для различных металлов контактных пар, а также схем и условий эксплуатации.

### Контактное давление

Заметные повреждения от фреттинга могут возникать даже при самых незначительных давлениях. Оценка влияния нагрузки на развитие фреттинг-коррозии усложняется тем, что в процессе работы сопряжения фактическое контактное давление не остается постоянным. Это связано с изменением исходного микрорельефа контактирующих поверхностей контактов и образования между ними прослойки продуктов износа.

Закон изменения величины износа контактных пар в зависимости от величины контактного давления может быть различным (линейным или параболическим) для различных схем конструктивных решений, свойств материалов покрытий, амплитуд скольжения и диапазонов контактных давлений, а также условий эксплуатации.

Если жесткость конструкций РЭА, или испытательной аппаратуры, если это касается испытаний, недостаточна, то увеличение давления в контактной паре может привести к уменьшению амплитуды относительного перемещения контактов и соответственно к снижению величины износа. Однако умень-

шение износа по достижении некоторого значения контактного давления следует связывать не только с уменьшением амплитуды скольжения, так как аналогичная закономерность наблюдается и в случае, когда амплитуда поддерживается постоянной. Такой характер изменения износа свидетельствует о том, что с повышением контактного давления происходит смена ведущих процессов фреттинг-коррозии. При небольших контактных давлениях на контактирующих поверхностях протекают наиболее типичные для фреттинг-коррозии усталостно-коррозионные процессы, когда кислород воздуха еще относительно легко поступает в зону трения. Наблюдаемое снижение износа при возрастании контактного давления в определенных пределах связано с интенсификацией процессов схватывания и взаимного переноса металла с контактной поверхности одного контакта на другой. Хотя общие материальные потери уменьшаются, тем не менее, с ростом контактного давления увеличивается глубина локальных повреждений. Увеличение контактного давления сопровождается замедлением роста силы трения, что обусловлено пластическим течением металла покрытия и активизацией тепловых эффектов.

#### Частота колебаний

При изменении частоты колебаний меняются три фактора:

- период цикла;
- скорость относительного перемещения контактов;
- контактная температура.

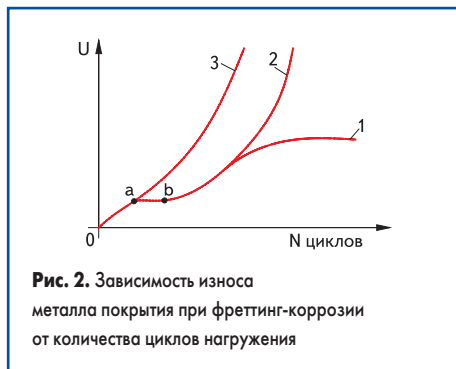
Обычно с повышением частоты колебаний фреттинг-износ контактов в воздухе убывает до определенного значения, а затем намечается тенденция к его стабилизации. Установлено, что износ в атмосфере инертных газов от частоты колебаний не зависит. Одним из основных факторов, который определяет величину износа, является образование и разрушение поверхностных окисных пленок. С уменьшением частоты колебаний при постоянной амплитуде время окисления участков фактического контакта металлических поверхностей между циклами «разрушения-удаления» окисной пленки возрастает, соответственно возрастает и износ контактирующих поверхностей.

Критическая частота — это частота, при которой происходит максимальный износ, и скорость роста износа напрямую зависят от стойкости материала покрытия контактов к окислению. Эффект частоты возрастает с увеличением амплитуды скольжения, контактного давления и продолжительности работы или испытаний.

Изменение интенсивности изнашивания при фреттинг-коррозии с изменением частоты колебаний также объясняется тем, что усталостная долговечность металлов при уменьшении частоты нагружения заметно снижается.

#### Число циклов нагружения

Разрушение контактирующих поверхностей вследствие фреттинг-коррозии увеличивается с ростом продолжительности эксплуата-



**Рис. 2.** Зависимость износа металла покрытия при фреттинг-коррозии от количества циклов нагружения

ции или испытаний. Однако закономерность развития фреттинг-коррозии с ростом числа циклов может изменяться в зависимости от свойств материала покрытия, амплитуды скольжения и контактного давления. Обычно скорость износа металлических покрытий контактирующих поверхностей при фреттинге велика в начальный период — период приработки, как и при обычном износе, а затем она уменьшается, причем на ранней стадии возможно существование на кривой износа горизонтального участка, связанного с повторным переносом металла с одной поверхности на другую (рис. 2).

На рис. 2 представлен участок кривой износа (точки а и b), где наблюдается повторный перенос металла с одной поверхности на другую.

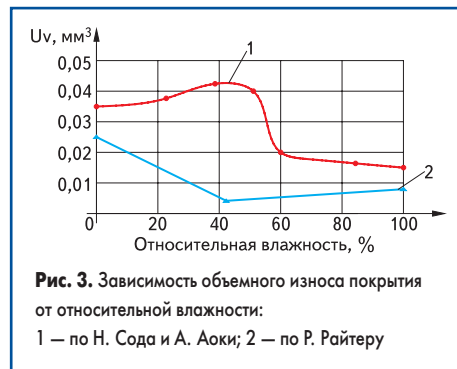
При малых амплитудах и контактных давлениях кривая износа на определенном этапе эксплуатации или испытаний может приобрести загущающий характер (кривая 1). При сравнительно больших амплитудах, а также при больших контактных давлениях величина износа обычно пропорциональна пройденному пути (кривая 2). Возможны случаи, когда при возникновении очень твердых продуктов фреттинг-коррозии (образование твердых окислов металлов покрытий) износ с самого начала возрастает линейно, свидетельствуя о преимущественной роли микрорезания (кривая 3).

Если тангенциальные смещения контактирующих поверхностей сопровождаются пульсациями нормальной нагрузки, то есть в процессе осциллирующих перемещений изменяется и контактное давление, то износ может приобрести катастрофическую скорость.

#### Внешняя среда

Интенсивность фреттинг-коррозии контактов сильно зависит от коррозионной активности внешней среды, и тем в большей степени, чем выше химическая активность металла покрытия. Износ контактирующих поверхностей в воздушной среде больше, чем в вакууме или среде нейтральных газов. В среде кислорода все металлы покрытий и их сплавы больше повреждаются фреттинг-коррозией, чем в воздушной среде.

Влияние влажности на развитие фреттинг-коррозии еще недостаточно изучено. По одним сведениям с увеличением влажности до 100% износ покрытия уменьшается на 50–60% по сравнению с сухим воздухом. По другим данным изменение износа с ростом влажнос-



**Рис. 3.** Зависимость объемного износа покрытия от относительной влажности: 1 — по Н. Сода и А. Аоки; 2 — по Р. Райтеру

ти может быть более значительным, причем зависимость износа в функции от влажности не всегда имеет монотонный характер (рис. 3).

Необходимо отметить, что для электрических соединителей максимально допустимая влажность не должна превышать 96% при температуре не более 55 °С.

Установлено, что одним из факторов, способствующих уменьшению износа во влажном воздухе, является изменение фрикционных характеристик вследствие адсорбции или капиллярной конденсации водяных паров на трущихся поверхностях контактов.

При наличии высокой влажности в виде морского тумана процесс износа за счет фреттинг-коррозии увеличивается вследствие активизации коррозионных процессов.

Обычно износ в воздухе в несколько раз выше, чем при испытании в жидких не агрессивных средах. В данном случае скорость образования защитных окисных пленок в жидких средах выше, чем при сухом трении. Кроме того, в жидкости продукты износа имеют меньшую твердость и абразивную способность, а также частично вымываются из зоны контакта, что снижает абразивный износ.

#### Смазка

Основная масса электрических соединителей работает в условиях сухого трения, то есть на контактирующих поверхностях отсутствует какого-либо рода смазка, за исключением окисных пленок или пленок потускнения. Кроме того, проведение регламентных работ в период эксплуатации соединителей предусматривает дополнительную очистку контактов от продуктов износа, разного рода пыли, а также, в ряде случаев, — применение очищающих растворителей для их очистки.

Применение традиционных классических смазок для контактирующих поверхностей исключается по ряду причин, которые могут создавать дополнительные проблемы:

- увеличение переходного сопротивления контактной пары;
- снижение электропрочности и сопротивления изоляции;
- создание благоприятных условий для дополнительной адсорбции продуктов износа и загрязняющих элементов окружающей среды и, как следствие, значительное снижение технических характеристик электрических соединителей.

Для электрических соединителей необходима специальная смазка, которая исключала бы указанные недостатки и обеспечивала бы сни-

жение коэффициента трения и износа контактирующих поверхностей при сохранении заданных электрических параметров. Кроме того, эта смазка должна иметь хорошую сцепляемость с покрытием контактирующей поверхности, выдерживать необходимое давление, обладать высоким сопротивлением окислению и стабильностью свойств во времени. К сожалению, смазок, обладающих комплексом перечисленных свойств, пока не удается получить.

Хорошие результаты по снижению коэффициента трения и износа покрытия в контактных парах дает применение в качестве твердой смазки фторопласта. На ФГУП «Карачевский завод «Электродеталь»» эта технология уже длительное время применяется. Суть ее заключается в том, что в процессе галтовки штыревых контактов с наполнителем в виде фторопластовых элементов различной конфигурации на поверхность контактов наносится тончайшая пленка (несколько молекулярных слоев) из фторопласта. Опыт показывает, что нанесение фторопластовой пленки достаточно производить на поверхность одного из контактов контактной пары. Скорость нанесения фторопластовой пленки и ее толщина регулируются технологическими режимами, то есть скоростью вращения галтовочного барабана, временем галтовки, соотношением объемов загрузки деталей и наполнителя-фторопласта, формой и размерами фторопластовых элементов.

Процесс галтовки деталей с фторопластом решает не только задачу нанесения тонкой пленки защитного антифрикционного слоя, но и корректирует микрогеометрию поверхностного слоя контактов. Толщина фторопластовой пленки в несколько молекулярных слоев не оказывает значительного влияния на увеличение переходного сопротивления контактной пары. Оно находится в допустимых пределах для практического использования.

### Фреттингостойкость различных материалов

Повреждению и износу при фреттинге подвергаются в той или иной мере все материалы в любом сочетании. В зависимости от контактного давления, амплитуды скольжения, продолжительности работы, окружающей среды (давления, влажности, температуры, наличия агрессивных компонентов и т. п.) некоторые комбинации материалов могут повреждаться более, чем другие, в одних условиях и оказывать менее чувствительными при других условиях.

Между твердостью металлов и фреттингостойкостью нет определенной связи. Лишь металлы и сплавы, неокисляющиеся или незначительно окисляющиеся, проявляют повышенную сопротивляемость фреттингу с ростом твердости. Повреждаемость поверхности при фреттинг-износе в значительной степени зависит от абразивной способности продуктов износа. Кроме того, сопротивляемость фреттинг-износу зависит от способности металлов и сплавов противостоять дина-

Таблица. Значение нормальных электродных потенциалов

Металл	Нормальный электродный потенциал, мкВ
Алюминий	-1,30
Цинк	-0,76
Хром	-0,56
Железо	-0,44
Кадмий	-0,40
Кобальт	-0,26
Никель	-0,25
Олово	-0,14
Медь	+0,34
Родий	+0,68
Серебро	+0,81
Золото	+1,50

мическим нагрузкам (циклическая прочность), от коррозионной активности и от их упруго-вязких свойств.

В некоторых случаях важную роль в повреждаемости поверхностей контактов фреттинг-коррозией играет электрохимический фактор. Чем более положителен электродный потенциал металла или металла покрытия одного контакта по отношению к другому, тем меньше он повреждается фреттинг-коррозией.

Значения нормальных электродных потенциалов основных металлов, используемых для изготовления контактов и их покрытий, представлены в таблице.

В ряде случаев с коррозионным фактором конкурирует механический: металл с низкой коррозионной стойкостью, но с высокой циклической прочностью хорошо противостоит фреттингу. С другой стороны, высокая коррозионная стойкость при относительно низкой прочности также обеспечивает достаточную сопротивляемость металла фреттинг-коррозии. При сопоставлении металлов с соизмеримой химической активностью вытекает, что повреждаемость коррелирует с циклической прочностью. Электрохимический фактор начинает действовать при появлении в зоне трения окислов в высокодисперсном состоянии, способных активно адсорбировать и удерживать на своей поверхности влагу и кислород воздуха.

### Температура и тепловые явления

Для основной массы электрических соединителей температурный режим их эксплуатации находится в пределах от  $-65$  до  $+160$  °С. На практике установлено, что при понижении температуры эксплуатации соединителей вплоть до  $-140$  °С скорость фреттинг-коррозии возрастает, а в диапазоне температур от  $+50$  до  $+150$  °С практически не изменяется и остается на прежнем уровне. Возрастание скорости фреттинг-коррозии при понижении температуры окружающей среды можно объяснить охрупчиванием металлов покрытий, а также возрастанием адсорбции газов в поверхностных слоях покрытия, что сказывается в свою очередь на увеличении скорости химических реакций окисления.

Кроме температуры окружающей среды, вибрационное контактное взаимодействие само

приводит к существенному повышению температуры в поверхностных слоях металлических покрытий контактирующих элементов, величина которой зависит от амплитуды скольжения, величины контактного давления и теплофизических свойств контактируемых поверхностей. На контактирующих поверхностях могут возникать высокие мгновенные температуры до  $700 \dots 800$  °С даже при небольших контактных давлениях. Эти температуры локализируются в точках фактического контакта поверхностей. Необходимо также учитывать температурные изменения, происходящие в контактах при прохождении через них электрического тока. Известно, что при прохождении электрического тока по проводнику он нагревается вследствие ударов и трения, происходящих внутри кристаллических решеток при перемещении в них электронов. Таким образом, часть электрической энергии превращается в тепловую. Еще большее количество тепла выделяется на участке непосредственного контактирования за счет переходного сопротивления.

Для металлов и сплавов покрытий, имеющих пониженную теплопроводность, при прочих равных условиях, контактные тепловые явления проявляются в большей степени, что может приводить к структурным изменениям поверхностного слоя и активизации процессов схватывания.

### Механизм фреттинг-коррозии

Обобщенный подход к изучению механизма фреттинг-коррозии позволяет выделить три основных стадии развития фреттинг-коррозии металлов и сплавов покрытия электрических контактов в условиях сухого трения. На первой стадии процесса фреттинга наблюдается упрочнение контактирующих поверхностей контакта и циклическая текучесть тончайших поверхностных слоев, большая часть выступов фактического контакта взаимодействует друг с другом пластически. Этому способствует схватывание ювенильного металла в соприкасающихся микронеровностях после разрушения естественных оксидных пленок и пленок потускнения. Разрушившиеся вследствие усталости выступы и срезавшиеся узлы схватывания создают первичные продукты разрушения, из которых часть окисляется. Однако большую часть продуктов износа на этой стадии фреттинга составляют металлические частицы. Переход поверхностных слоев в дисперсное и ультрадисперсное состояние ускоряет реакции окисления.

На второй стадии фреттинг-коррозии в поверхностных слоях продолжают накапливаться усталостные повреждения. Одновременно с усталостными повреждениями в виде ультрадисперсного слоя частиц металла их окислов в зоне трения формируется коррозионно-активная среда вследствие адсорбции на окислах кислорода и влаги. Скорость износа на этой стадии невелика, и износ связан в основном с разрушением образующихся на поверхностях трения оксидных пленок, причем количество продуктов износа в зоне трения

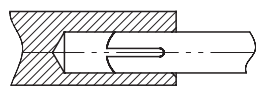


Рис. 4. Контактная пара, у которой затруднен выход продуктов износа

оксидных пленок достигает равновесного значения вследствие того, что выход частиц из зоны контакта уравнивается их возникновением. В основном применяемые конструкции контактных пар имеют достаточно свободных зон для беспрепятственного выхода продуктов износа, что исключает заклинивание контактной пары из-за их скапливания и уплотнения.

Однако имеются и такие контактные пары, в которых возможность выхода продуктов износа крайне затруднена.

Примером такой пары может служить гнездо с глухим цилиндрическим отверстием и цилиндрический контактный штырь (рис. 4).

В данном случае в процессе фреттинг-износа происходит накопление продуктов износа в закрытом объеме, что приводит к увеличению усилия сочленения-расчленения, а в ряде случаев и к заклиниванию контактной пары. На тех участках контакта, где имеет место разрушение поверхностных окисных пленок, интенсивно развиваются процессы схватывания. Интенсивность их развития дополнительно повышается и за счет того, что в процессе образования продуктов износа происходит как бы герметизация рабочей зоны контактной пары. Соответственно, в эту зону практически прекращается доступ кислорода и влаги, в связи с чем резко замедляются процессы образования окисных пленок, и контактирование идет по чистым поверхностям, более склонным к схватыванию.

На этой стадии действует особый (механико-химический) механизм интенсификации окисления металлических поверхностей, связанный с тем, что при знакопеременных контактных взаимодействиях в тончайших поверхностных слоях возникает мелкодисперсная структура, склонная к активному окислению. В дальнейшем, в поверхностном слое, образуется смешанная структура — из металла покрытия и окислов этого металла, которая может играть защитную роль, уменьшая скорость износа. Второй период фреттинг-коррозии можно назвать инкубационным. В оптимальных условиях сформировавшегося контакта предварительно упрочненные слои покрытия испытывают более умеренные циклические нагрузки, однако в них происходит дальнейшее накопление усталостной повреждаемости, усугубляемое коррозионными процессами.

Образующиеся при фреттинг-коррозии металлов окислы высокой дисперсности, являясь полупроводниками, придают процессу каталитический характер. Такое действие окислов проявляется в ускорении процессов адсорбции кислорода и влаги в активных радикалах и ион-радикальных формах. При этом между контактирующими поверхностями электрических контактов формируется реакционная электролитическая среда.

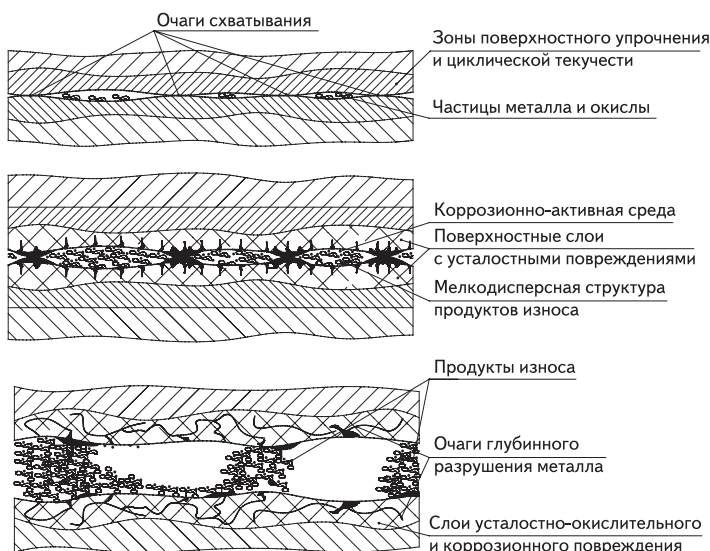


Рис. 5. Механизм разрушения металлов при фреттинг-коррозии: I — упрочнение сопряженных поверхностей; II — формирование коррозионно-активной среды; III — развитие глубинных разрушений металла

Третья стадия фреттинг-коррозии связана с окончательным разрушением зон повреждаемости контактных поверхностей, предварительно уже разрыхленных усталостными и коррозионными процессами. С учетом возможности протекания электрохимических процессов эту стадию можно назвать стадией коррозионно-усталостного разрушения. В этот период поверхностные слои металла, длительное время подвергавшиеся циклическим деформациям, становятся настолько разупрочненными, что теряют устойчивость, и начинается их прогрессирующее отделение, что проявляется в скорости износа. Механизм разрушения поверхностных слоев контактирующих поверхностей представлен на рис. 5.

### Количественная оценка фреттинг-коррозии

Современное состояние теории фреттинг-коррозии не в полной мере позволяет производить расчеты интенсивности изнашивания материалов сугубо аналитическим методом. Существующие же экспериментально-аналитические методы оценки износа контактирующих поверхностей вследствие фреттинг-коррозии можно разделить на два направления, в зависимости от того, что принимается в качестве критерия фреттингостойкости.

К первому направлению следует отнести расчет фреттингостойкости металлов, предложенный А. С. Ахматовым и М. С. Островским. В качестве критерия фреттингостойкости в этом расчете принимают длительность латентного периода фреттинг-коррозии —  $\tau$ , после которого нарушается сплошность граничного смазочного слоя (в качестве граничного смазочного слоя рассматриваются окисные пленки, пленки потускнения, адсорбированные продукты окружающей среды, в том числе влаги, упомянутые фторопластовые пленки и т. п.) и на поверхности контакта образуются повреждения в виде задигов, раковин, вырывов металла и т. п.

$$\tau = k_1 R_a e^{-\frac{k_2 ANf}{R_a}}, \quad (1)$$

где  $A$  — амплитуда относительного смещения контактов;  $N$  — нормальная нагрузка;  $f$  — частота вибрации;  $k_1$  и  $k_2$  — эмпирические коэффициенты, определяемые из экспериментальных данных;  $R_a$  — характеристика шероховатости поверхности.

Первое направление экспериментально-аналитического метода оценки интенсивности фреттинг-коррозии можно лишь условно отнести к количественному методу оценки, так как в нем определяется лишь продолжительность латентного периода фреттинг-коррозии и не дается количественной оценки самого износа металла не в виде линейного и не в виде объемного износов.

Второе направление количественной оценки фреттингостойкости электрических контактов предполагает проведение расчетов величины износа.

Уравнение для величины приведенного износа при фреттинг-коррозии базируется на усталостно-коррозионном механизме фреттинг-коррозии и имеет вид:

$$\Delta F_n = k_1 N a_t N_u + (k_2 + k_3 N + k_4 N^2) \times (N_u / f), \quad (2)$$

где  $k_1-k_4$  — коэффициенты, зависящие от химической активности, удельной поверхностной энергии и усталостной прочности металлов покрытия;  $N_u$  — число циклов;  $N$  — нормальная нагрузка;  $a_t$  — касательные контактные перемещения;  $f$  — частота вибрации.

Расчет коэффициентов  $k_1-k_4$  проводится на основании экспериментальных данных для  $\Delta F_n$  при нескольких сочетаниях  $N$ ,  $N_u$ ,  $f$  и  $a_t$  (обычно не менее трех сочетаний).

Необходимо отметить еще один метод количественной оценки износа контактирующих поверхностей при фреттинг-износе, базирующийся на условиях касания и взаимного внедрения контактирующих поверхностей. Этот метод расчета подробно изложен в рабо-

те авторов «Расчет контактов электрических соединителей на износ». Суть этого метода состоит в решении системы уравнений, составленных из условий касания контактирующих поверхностей и законов изнашивания для конкретной контактной пары.

### Защита от фреттинг-коррозии

Повреждение и износ контактирующих поверхностей электрических контактов в основном определяется рядом ведущих процессов, к которым в первую очередь относятся:

- коррозионно-усталостные процессы;
- схватывание;
- микрорезание.

Эти процессы развиваются в поверхностном слое контактов одновременно, однако, в зависимости от свойств металлов покрытий контактов, величины контактного давления и режимов эксплуатации, один из них становится ведущим и ограничивает ресурс работы контактной пары и в целом соединителя. Такое дифференцирование процессов, протекающих в поверхностных слоях покрытий контактов при фреттинг-коррозии, дает возможность наиболее рационально классифицировать и проводить необходимые мероприятия по предотвращению фреттинг-коррозии. На рис. 6 представлена схема выбора методов защиты от наиболее типичного для фреттинг-коррозии процесса — коррозионно-усталостного разрушения.

Сложная взаимосвязь физико-химических процессов при фреттинг-коррозии, а также влияние большого числа факторов, определяющих активность этих процессов в каждом конкретном случае, затрудняет разработку универсальных методов защиты. Поэтому большинство предложенных методов разработано и апробировано для частных случаев с конкретными условиями эксплуатации соединителей, в зависимости от которых один и тот же метод может давать различный эффект.

К числу мероприятий, предотвращающих относительное перемещение контактирующих поверхностей и фреттинг-коррозию, относятся такие конструктивные решения, как увеличение контактного давления, использование демпфирующих устройств для гашения вибрации, применение «плавающих» контактных пар, когда в процессе работы соединителя вилочный контакт не перемещается относительно гнездового контакта, а перемещается полностью контактная пара относительно изоляторов. Следует учитывать, что и отклонения от заданных геометрических параметров способствуют возникновению фреттинг-коррозии, поэтому соблюдение заданных микро- и макрогеометрических параметров, установленных в КД, является обязательным условием.

Относительное перемещение контактов в контактной паре можно исключить или максимально уменьшить за счет уменьшения тангенциальной силы, путем нанесения на контактирующие поверхности одного или обоих контактов покрытий с малым модулем упругости, но при условии, что при данной амплитуде скольжения тангенциальная сила не достигает предельной величины силы трения.

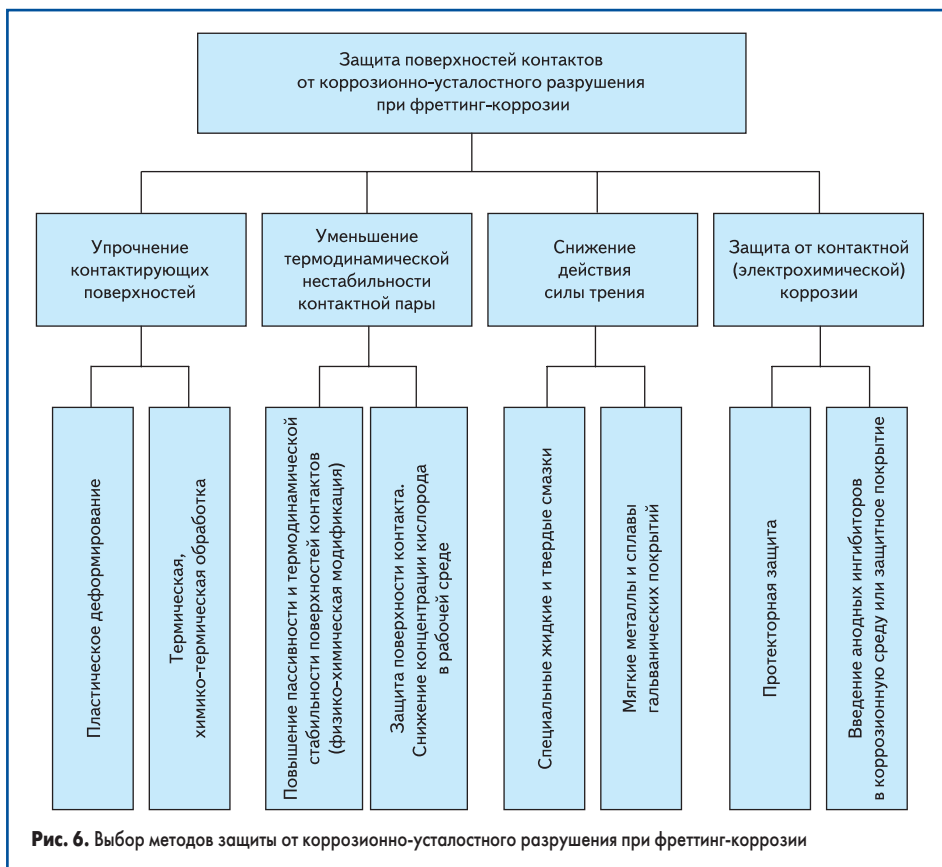


Рис. 6. Выбор методов защиты от коррозионно-усталостного разрушения при фреттинг-коррозии

Широкие возможности для предупреждения фреттинг-коррозии дает подбор пар контактирующих материалов, слабо восприимчивых к фреттинг-коррозии. В качестве таких материалов можно использовать не только чистые металлы, но и их сплавы, например серебро-сурьма, золото-никель и т. д.

#### Методы защиты от ведущих процессов

К этой группе, прежде всего, относятся технологические методы физико-химической модификации контактирующих поверхностей, направленные на упрочнение контактирующих поверхностей, защищающие поверхность контакта от воздействия коррозионной среды, уменьшающие термодинамическую нестабильность соединителей, снижающие действия сил трения и т. д. Эффективны методы механической, термической и химико-термической обработки, гальванические покрытия и химическая обработка поверхностей.

Однако при выборе защитного покрытия для контактов, работающих в условиях фреттинговой усталости, необходимо учитывать возможное влияние этого покрытия на усталостную прочность основного металла этих контактов, так как во многих случаях процесс покрытия связан с погружением защищаемой поверхности в кислую среду. Это приводит к «наводораживанию» поверхностного слоя, а, следовательно, и к уменьшению усталостной прочности. Эффекты, связанные с «наводораживанием» покрытий, могут снизить усталостную прочность в большей степени, чем повреждение от фреттинг-коррозии. Большинство гальванических покрытий, применяемых для покрытия контактирующих элементов, необходимо использовать в сочета-

нии с другими видами упрочняющей и специальных обработок. В частности, ощутимый эффект по снятию «наводораживания» достигается при проведении термической выдержки на детали, покрытые золотом и серебром, при температуре 180...200 °С в течение 1,5–2 часов. Гальванические покрытия рекомендуется использовать на вспомогательных деталях (шайбах, втулках, прокладках и т. п.) как средство протекторной защиты от фреттинг-усталостного разрушения основных деталей контактной пары.

#### Заключение

В процессе хранения и эксплуатации электрических соединителей (гарантийный срок сохраняемости — 20–25 лет) в контактных парах происходят различные физико-химические изменения, связанные с процессом старения.

Установлено, что основная причина отказа электрических соединителей — это износ покрытий рабочих элементов в контактных парах. В настоящее время в ТУ на соединители износ покрытия контактных пар регламентируется только числом сочленений-расчленений. Исследования показали, что на долю процесса сочленений-расчленений реально приходится менее половины устанавливаемого ресурса по износу. Остальная его часть в основном реализуется за счет фреттинг-износа и незначительно за счет других, еще не установленных процессов износа. Объясняется это тем, что основное время соединители находятся в сочлененном состоянии, за исключением периодов хранения и проведения регламентных работ в РЭА. Независимо от того, проходит через электрический соединитель

ток или нет, при наличии вибрации процесс фреттинг-износа контактирующих поверхностей контактов не прекращается. Необходимо учитывать, что процесс фреттинг-коррозии протекает в неконтролируемом режиме и поэтому является крайне опасным явлением из-за своих последствий.

Процесс фреттинг-коррозии еще недостаточно изучен, и, отчасти, поэтому его отрицательным последствиям уделяется недостаточно внимания. Хотя универсальных средств защиты от фреттинг-коррозии нет, или они нам пока еще неизвестны, но, учитывая важность этой проблемы, необходимо использовать все имеющиеся сегодня возможности. Необходимо исходить из того, что взаимное микроперемещение поверхностей контактов не может быть полностью исключено вследствие упругости материалов, поэтому отрицательные последствия процесса фреттинг-коррозии можно только минимизировать, то есть уменьшить до определенного предела.

Это можно сделать путем:

- максимального уменьшения взаимных микроперемещений контактов в контактной

паре, за счет увеличения контактного давления в допустимых пределах;

- применения различных конструкций демпферных устройств, с целью исключения влияния вибрации элементов РЭА на соединители;
- снижения силы трения, перевода трения из режима сухого трения в режим граничного трения, за счет применения специальных смазок, не ухудшающих электрические параметры контактной пары (например, нанесения мономолекулярного слоя фторопласта);
- уменьшения повреждения от фреттинг-коррозии за счет повышения твердости материала покрытия одного из контактов контактной пары и т. д.

#### Литература

1. Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техника, 1974.
2. Рябченков А. В., Муравкин О. Н. Фреттинг-коррозия и защита металлов. М.: ЦБНТИ, 1957.
3. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия. Л.: Машиностроение, 1976.
4. Филимонов Г. Н., Балацкий Л. Т. Фреттинг в соединениях судовых деталей. Л.: Судостроение, 1973.
5. Крагельский И. В., Алисина В. В. Трение изнашивания и смазка. М.: Машиностроение, 1978.
6. Реутт Е. К., Саксонов И. Н. Электрические контакты. М.: Военное издательство МО СССР, 1971.
7. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Энергия, 1975.
8. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961.
9. Сафонов Л. И., Сафонов А. Л. Электрические прямоугольные соединители. Анализ физических процессов в контактах // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 6.
10. Сафонов Л. И., Сафонов А. Л. Электрические прямоугольные соединители. Трение и износ в контактах электрических соединителей // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 3.