

Электрические прямоугольные соединители

Трение и износ в контактных парах электрических соединителей

В статье рассмотрены основы теории трения и износа. Определены основные виды изнашивания, установлены механизмы и стадии изнашивания контактных пар электрических соединителей, а также даны рекомендации по снижению негативных последствий процессов изнашивания.

Леонид Сафонов
Александр Сафонов

edet@online.debryansk.ru

Разработка, функционирование и обеспечение высокой надежности заявленных технических характеристик электрических соединителей в процессе длительной эксплуатации напрямую связаны с явлениями трения и износа.

Введение

Процесс износа покрытий контактных пар электрических соединителей является очень сложным комплексным процессом механических, физических, химических и электрических явлений, которые, взаимодействуя между собой, определяют его течение. Необходимо заметить, что здесь и далее нами будут рассматриваться процессы, происходящие в поверхностном слое контактов, то есть в слое металлического покрытия.

Прежде чем приступить к рассмотрению процесса изнашивания, необходимо рассмотреть общие сведения о поверхности деталей и ее геометрии.

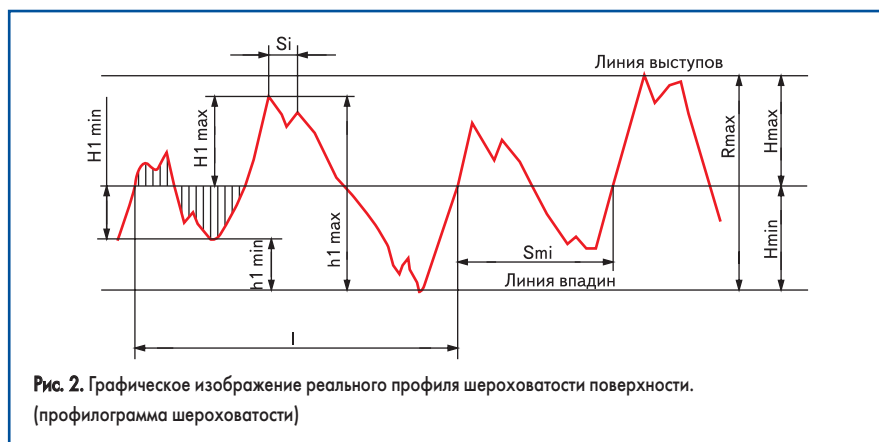
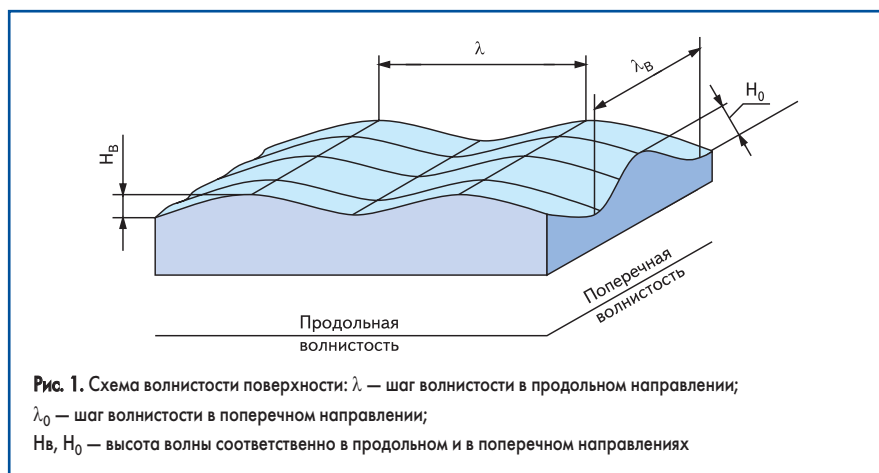
В технике под поверхностью понимают наружный слой, который по строению и другим физическим свойствам отличается от внутренних слоев. Комплекс свойств, приобретаемых поверхностью детали в результате ее обработки, характеризуется понятием «качество поверхности».

Качество поверхности определяется геометрией поверхности как границей и физико-химическими свойствами, обусловленными процессом ее образования при обработке детали. Погрешности обработанной поверхности с точки зрения причин их образования и методов измерения, применяемых для их оценки, можно разделить на три категории: макрогеометрические отклонения, волнистость поверхности, шероховатость поверхности.

Макрогеометрическими называют отклонения формы поверхности от заданной.

Под волнистостью поверхности понимают совокупность более или менее регулярно чередующихся возвышений и впадин с шагом волны, значительно превышающим ее высоту (рис. 1).

От шероховатости волнистость поверхности отличается значительно большим шагом и высотой волны. Реальная поверхность не является гладкой, она имеет неровности: выступы и впадины с относительно малыми расстояниями между ними. Эти неровности, образующие в совокупности рельеф поверхности, называются шероховатостью. Иногда их



именуют микронеровностями. Контур сечения реальной поверхности плоскостью, перпендикулярной соответствующей идеальной геометрической поверхности, образует профиль, характеризующий микрогеометрию поверхности контакта (рис. 2).

Шероховатость — совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине. ГОСТ 2789 предусматривает шесть параметров, характеризующих шероховатость поверхности: три высотных — Ra, Rz и Rmax, два шаговых — S и Sm и относительная длина профиля t_p .

Физико-химические свойства поверхностей деталей

Поверхностная энергия

Поверхностный слой металла обладает большой активностью. Это обусловлено тем, что внутри твердого тела каждый атом кристалла окружен другими атомами и связан с ними прочно по всем направлениям, а у атомов, расположенных на поверхности, с внешней стороны нет «соседей» в виде таких же атомов. В связи с этим в поверхностном слое у атомов твердого тела остаются свободные связи, наличие которых создает вблизи поверхности атомное (молекулярное) притяжение.

Поверхностные атомы вследствие свободных связей обладают большей энергией, чем атомы, находящиеся внутри. Избыток энергии, отнесенный к единице поверхности, называется удельной поверхностной энергией или просто поверхностной энергией.

Адсорбция и хемосорбция

В результате взаимодействия ненасыщенных силовых полей твердого тела с силовыми полями молекул газа, паров воды, паров других жидкостей, а также веществ, растворенных в жидкостях, поверхность твердого тела покрывается тонкой пленкой. Явление образования на поверхности последнего тончайших пленок газов, паров или растворимых веществ либо поглощения этих веществ поверхностью тела называется адсорбцией.

Молекулы веществ, адсорбированных на поверхности твердого тела, обладают способностью перемещаться по поверхности из областей, где имеется их избыток, в места, где их недостаточно для полного покрытия поверхности. Адсорбция бывает физическая и химическая.

Хемосорбция, в отличие от физической адсорбции, носит избирательный характер, она протекает с большей интенсивностью в местах нарушения регулярности кристаллической решетки. Во многих случаях физическая и химическая адсорбции протекают одновременно, но одна из них всегда является преобладающей.

Пленки на металлических поверхностях

Практически все металлы подвергаются окислению. Металлические поверхности в процессе обработки очень быстро покрываются

первичной оксидной пленкой. Такие пленки обнаруживаются и на благородных металлах. Скорость образования оксидной пленки на поверхности металла исчисляется долями секунды. Так, для возникновения слоя толщиной 1,5 нм достаточно 0,05 с. С увеличением толщины рост пленки замедляется.

Оксидная пленка находится в напряженном состоянии, испытывая растяжение или сжатие в зависимости от соотношения объемов основного металла и образовавшегося на его базе окисла. С увеличением толщины пленки возрастают силы упругости в самой пленке и на границе между пленкой и основным металлом. При некоторой толщине пленки происходит потеря ее устойчивости, наступают мгновенные смещения и пленка приобретает пористое (рыхлое) строение.

Контактирование деталей

Взаимное соприкосновение деталей происходит на вершинах волн и выступах поверхностей, образованных макронеровностями. Процесс контактирования поверхностей при статическом нарушении протекает следующим образом. Поверхность воспринимает нагрузку вершинами выступов неровностей на высотах, образуемых геометрическими отклонениями. Здесь располагаются зоны, из которых складывается фактическая площадь касания. В контакт первыми вступают противостоящие друг другу на сопряженных поверхностях выступы, сумма высот которых наибольшая. Деформация неровностей и их основ вызывает сближение поверхностей. Разновременность вхождения в контакт выступов, различающихся по высоте, дифференцирует их напряженное состояние и деформацию. Возможны следующие деформации выступов: упругая; упругопластическая без упрочнения; упругопластическая с упрочнением. При небольших усилиях, таких, как в нашем случае, имеет место упругопластическая деформация без упрочнения. В большинстве случаев первичного нагружения пластической деформации принадлежит ведущая роль в формировании фактической площади контакта. Входящие в касание выступы пластически сплющиваются, чаще всего с внедрением: внедряется более твердый выступ или тот, которому геометрическая форма придает большее сопротивление деформации. После деформации, даже сильной, шероховатость контактирующих поверхностей лишь несколько видоизменяется.

Площадь фактического контакта поверхностей состоит из множества дискретно малых площадок, расположенных на различных высотах пятен касания в местах наиболее полного сближения поверхностей. Между площадками касания контактов имеются соединенные между собой или закрытые микрополости, заполненные воздухом или другой газовой средой, продуктами изнашивания и т. п.

Площадь фактического контакта составляет от одной десятитысячной до одной десятой номинальной площади касания. Она возрастает при увеличении нагрузки, уменьшении

шероховатости контактирующих поверхностей. Кроме того, она несколько увеличивает при большой длительности действия нагрузки.

При сопряжении поверхностей из двух различных металлов площадь фактического контакта определяется физико-механическими свойствами более мягкого материала и геометрией поверхности более твердого материала. При их контактировании под нагрузкой происходит образование шероховатости поверхности вследствие неоднородности деформации. В результате на отдельных площадках фактического контактирования, начиная с малых нагрузок, происходит взаимное внедрение твердых составляющих и кристаллов в менее твердые структурные составляющие. Неоднородность металла, вызванная всевозможными включениями, сегрегацией примесей, трещинами, остаточными напряжениями и т. п., благоприятствует взаимному внедрению поверхностей.

Для изнашивания поверхностей трения имеет значение не сам факт изменения их шероховатости, обусловленный неоднородностями строения металлов, а связанное с ним взаимное внедрение поверхностей.

Общие сведения о трении. Трение без смазки

В зависимости от того, является ли относительное перемещение соприкасающихся пар макро- или микросмещением, различают силу трения движения, неполную силу трения покоя и наибольшую силу трения покоя. Сила трения движения — сила сопротивления при относительном перемещении соприкасающихся тел под действием внешней силы, тангенциально направленной к общей границе между этими телами.

Наибольшая сила трения покоя — сила предельного сопротивления относительному перемещению соприкасающихся тел без нарушения связи между ними и при отсутствии смещения на контакте.

Приложенная к одному из тел параллельно плоскости касания сила, превышающая хотя бы на бесконечно малую величину силу трения покоя, уже нарушает равновесие.

Неполная сила трения покоя — сила сопротивления, направленная противоположно усилию сдвига, при отсутствии смещения на контакте.

Трение имеет молекулярно-механическую природу. На площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях, в десятки раз превышающих межатомное расстояние в кристаллических решетках, и увеличиваются с повышением температуры. Молекулярные силы вызывают на участках контакта адгезию. Она возможна между металлами и пленками окислов. Адгезия может быть обусловлена одновременно и действием электростатических сил. Силы адгезии, как и молекулярные силы, прямо пропорциональны площади фактического контакта.

Молекулярные силы как силы, перпендикулярные поверхности, казалось бы, не должны производить работу при относительном тангенсальном перемещении поверхностей. То же должно относиться и к силам адгезии, если образовавшаяся вследствие адгезии связь между телами разрушается по месту соединения. На самом же деле относительное смещение поверхностей при наличии взаимного притяжения и адгезии сопровождается деформацией сдвига, что вследствие неидеальной упругости материала требует дополнительных затрат энергии. Разумеется, большую тангенсальную силу надо приложить, если связь между телами нарушается не по месту соединения, а на некоторой глубине от поверхности контакта.

Более сильным проявлением молекулярных сил является схватывание поверхностей — приваривание, сцепление, местное соединение двух твердых тел под действием молекулярных сил. Сила трения в этом случае зависит от протяженности зон схватывания и сопротивления их разобщению.

Сила трения T обусловлена механическим и молекулярным взаимодействиями:

$$T = aS_{\phi} + \theta P, \quad (1)$$

где a — средняя интенсивность молекулярной составляющей силы трения; S_{ϕ} — фактическая площадь контакта; θ — коэффициент, характеризующий механическую составляющую силы трения; P — сила давления.

Коэффициент трения f представляет собой отношение силы трения к силе давления:

$$f = T/P, \quad (2)$$

на основании формул (1) и (2) имеем:

$$f = aS_{\phi}/P + \theta. \quad (3)$$

Статическая сила трения в зависимости от продолжительности неподвижного контакта возрастает до некоторого предела.

Сила трения движения зависит от скорости взаимного перемещения тел, причем коэффициент трения может изменяться и иметь максимум и минимум.

На поверхностях трения контактов даже в условиях высокого разряжения образуется окисная пленка. Свойства этой пленки в отношении равномерности покрытия, плотности и прочности связи с основанием, а также интенсивность образования пленки зависят от состава сплава. Пленка при соответствующем составе уменьшает силу трения и интенсивность изнашивания и предохраняет поверхности от коррозии и непосредственного контактирования. В разряженной атмосфере защитное действие пленки снижается.

Основные понятия о механизме изнашивания пар трения

Пара трения — совокупность двух подвижных сопряженных поверхностей деталей, в нашем случае контактов, в условиях эксплуатации или испытаний. Помимо материала,

формы контактирующих поверхностей, относительного их перемещения, пара трения характеризуется и окружающей средой, в которой происходит эксплуатация.

Разрушение поверхности твердого тела, проявляющееся в изменении его размеров или формы, называется изнашиванием.

Износ — результат изнашивания, выраженный в физических единицах длины, объема, массы или в невозможности обеспечивать заданные параметры.

Скорость изнашивания — отношение износа контактной пары к времени, в течение которого происходило изнашивание.

Износостойкость оценивается величиной, обратной скорости изнашивания. Предельный износ — это износ, при котором дальнейшая эксплуатация становится невозможной ввиду снижения надежности обеспечения заданных параметров.

Процесс изнашивания (по И. В. Крагельскому) деталей — это:

- взаимодействие поверхностей трения;
- изменения, происходящие в поверхностном слое металла;
- разрушение поверхностей.

Эти процессы непрерывно переплетаются, взаимно влияя друг на друга.

Взаимодействие поверхностей, как было уже сказано ранее, может быть механическим и молекулярным.

Механическое взаимодействие выражается во взаимном внедрении и зацеплении неровностей поверхностей в совокупности с их соударением в случае скольжения грубых поверхностей. Молекулярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Адгезия не только обуславливает необходимость приложения сил при сочленении и расчленении контактов, но и может привести к вырывам материала. Схватывание свойственно только металлическим поверхностям и отличается от адгезии более прочными связями. Молекулярное взаимодействие возможно также на участках взаимного внедрения поверхностей, оно обязательно будет при разрушении окисной пленки.

Разрушение трущихся поверхностей контактной пары происходит в виде отдельных элементарных процессов, сочетание которых зависит от материалов и условий трения. Существуют следующие элементарные виды разрушения.

Микрорезание. При внедрении на определенную глубину твердая частица абразива или продукта изнашивания может произвести микрорезание металла с образованием микрорезки. Однако микрорезание при трении и изнашивании в контактных парах электрических соединителей проявляется не очень часто и не является основным видом разрушения, так как глубина внедрения недостаточна при действующих контактных давлениях.

Царапание. Образовавшаяся или появившаяся на поверхности трения частица при скольжении перемещается в стороны и поднимает материал, оставляя царапину. Последняя обрывается при выходе внедрившегося элемента из зоны фактического контакта, при раздроблении частицы, ее впрессовывании или

уносе за пределы области трения. Повторное царапание по одному и тому же месту с одинаковой интенсивностью бывает очень редко, чаще зона последующего пластического деформирования перекрывает ранее образовавшуюся царапину.

Поверхности трения контактов соединителя покрываются царапинами, расположенными практически параллельно направлению скольжения, а между царапинами располагается материал, претерпевший многократную пластическую деформацию и неоднократный наклеп, то есть исчерпавший способность пластически деформироваться. При последующих сочленениях контактной пары с определенным контактным давлением на таком участке легко образуются трещины, с развитием которых материал отделяется от основы.

Очевидно, не только скользящие, но и перекатывающиеся частицы могут оставить на поверхности царапины. Внедрившаяся частица, упиравшись при своем движении в твердую составляющую материала, может отклониться в сторону, и поэтому направление царапины на поверхности не следует строго направлению перемещения контакта.

Глубинное вырывание возникает при относительном движении контактов — при сочленении и расчленении, когда образовавшийся вследствие их молекулярного взаимодействия спай прочнее одного или обоих материалов контактов. Разрушение происходит в глубине покрытия одного из контактов. Поверхности разрушения у пластичных материалов представляют собой выступающие выгнутые по направлению движения гребни и сужающиеся глубь материала конусы. Прилегающие к местам вырывов участки пластически деформируются в большей или меньшей степени. Вырванный материал остается на сопряженной поверхности. Это одна из причин переноса материала при трении. Может наблюдаться процесс схватывания отдельных составляющих сплава, остальные составляющие могут уходить из зоны трения.

При изнашивании разрушение поверхностей контактов может происходить в субмикроскопических масштабах, когда под действием внешних факторов, например потоком воздуха, уносятся обломки кристаллических образований. Продукты изнашивания могут иметь размеры от неразличимых пылинок до нескольких десятых долей миллиметра. Чистые участки поверхности в процессе их образования окисляются, сами продукты изнашивания в дальнейшем дробятся, слипаются, прилипают и впрессовываются в сопряженные поверхности контактов. Продукты изнашивания участвуют в процессе изнашивания в качестве промежуточной среды между поверхностями трения. Взаимное внедрение, глубинное вырывание, адгезия, заклинивание и впрессовывание продуктов изнашивания определяют перенос материала с одной поверхности трения на другую. Перенос материала происходит отдельными частицами, средний размер которых имеет вполне определенную величину для конкретных условий трения. Перенос материала на металлическую поверхность мо-

жет играть роль стимулятора коррозии металлической поверхности.

Перенос материала не характеризует скорость изнашивания поверхностей трения. Перенесенная частица может многократно переходить с одной поверхности трения на другую и обратно. Износ будет в том случае, если перенесенная частица уйдет из зоны трения. Это связано с процессами прямого и обратного переносов и зависит от конечного механизма отрыва перенесенной частицы, в частности от ее окисления или же от возникновения неблагоприятных напряжений на границе раздела между частицей и подложкой.

Стадии изнашивания контактной пары

Если отложить на оси абсцисс время работы или количество расчленений и сочленений контактной пары, а на оси ординат износ, то получим кривую изнашивания контактной пары во времени (рис. 3).

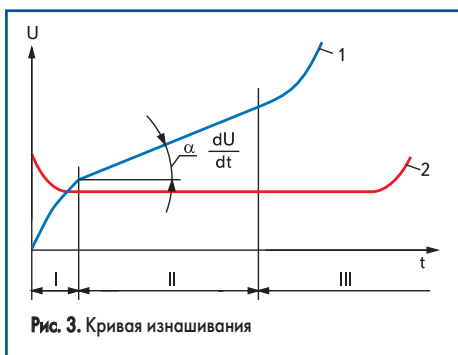


Рис. 3. Кривая изнашивания

Тангенс угла наклона, образованного осью абсцисс и касательной к кривой в произвольной точке, определяет скорость изнашивания в данный момент времени или при конкретном числе сочленений-расчленений.

На кривой изнашивания в общем случае (кривая 1) можно выделить три участка, соответствующие трем стадиям изнашивания:

- I — начальное изнашивание, наблюдаемое при приработке поверхностей трения контактной пары;
- II — (прямолинейный участок кривой) — установившееся изнашивание ($\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}$), наблюдаемое при нормальной эксплуатации сопряжения;
- III — процесс резкого возрастания скорости изнашивания, соответствующий стадии катастрофического изнашивания.

Контактная пара при первых сочленениях сопрягается по выступам неровностей поверхностей, обработанных при изготовлении контактов, и площадь их фактического контакта в начальный период трения мала, поэтому при заданном нагружении контактной пары (обеспечение требуемого единичного усилия сочленения-расчленения) действуют большие давления, результатом чего является значительная пластическая деформация. Неровности поверхностей частично сминаются и частично разрушаются как по выступам, так и по впадинам. В процессе сочленений-расчленений срабатывают микронеровности, сглаживание макронеровностей и волнистости по-

верхностей сопровождается увеличением несущей поверхности, интенсивность изнашивания снижается. Вместе с тем «пропахивание» поверхностей взаимно внедрившимися объемами и продуктами изнашивания в направлении относительной скорости поверхностей создает новые неровности, ориентированные вдоль направления движения и не совпадающие с направлениями первоначальных обработочных рисок. По истечении определенного времени при неизменных условиях работы создается стабильная шероховатость поверхностей трения. Она может быть больше или меньше начальной шероховатости: более грубые поверхности в процессе приработки выглаживаются, а гладкие становятся более грубыми. Каждая из сопряженных поверхностей к концу приработки приобретает свойственную ей шероховатость в данных условиях трения.

Микротвердость поверхностей контактов к концу приработки стабилизируется независимо от их начального состояния. За время приработки происходит передеформирование поверхности и изменение ее физико-химических свойств.

Процесс установившегося изнашивания заключается в деформировании, разрушении и непрерывном воссоздании на отдельных участках поверхностного слоя со стабильными свойствами. Износ контактных поверхностей может существенно изменить условия работы контактной пары электрического соединителя, начиная с ухудшения электрических параметров до полного отказа соединителя.

Кривая 2 на рис. 3 характеризует скорость изнашивания.

Распределение износа между деталями контактной пары

Как правило, контактная пара электрического соединителя состоит из двух деталей — штыревого и гнездового контактов. Закономерно было бы считать, что если материал этой пары трения одинаковый, то при прочих равных условиях и их износ тоже будет одинаковым. И наоборот, если материалы контактной пары различны, то и износ их будет различным. Но в реальных условиях такая закономерность не соблюдается. Интенсивность изнашивания каждой детали контактной пары определяется конкретным видом ее изнашивания. Может случиться так, что при одном виде изнашивания более интенсивно изнашивается одна деталь контактной пары, а при другом виде изнашивания — другая. Проведенные эксперименты показывают, что при одинаковых материалах контактной пары износы поверхностей контактов по массе не одинаковы: большая поверхность теряет больше массы. Установлено также, что соотношение линейных износов контактов зависит, соответственно, от соотношения поверхностей трения.

Мы рассмотрели основные виды износа, которые возникают в контактной паре электрического соединителя при его сочленении и расчленении.

В НТД на электрические соединители обязательно присутствует такой параметр, как минимальное число сочленений-расчленений, который должен быть обеспечен конструкцией соединителя при заданных условиях эксплуатации. Износ контактов в процессе сочленения-расчленения соединителя является очевидным процессом изнашивания. Однако существуют и такие процессы изнашивания, которые протекают в контактных парах сочлененных соединителей, где никаких видимых перемещений контактов относительно друг друга не происходит. К таким процессам относится фреттинг-коррозия.

Изнашивание контактов при фреттинг-коррозии

Фреттинг-коррозия — это процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей контактов контактной пары при их колебательных перемещениях. В процессе эксплуатации электрических соединителей в составе РЭА они подвергаются воздействию механических и климатических факторов в виде вибраций с различной частотой и амплитудой и воздействию агрессивных сред и различных излучений.

Для возбуждения фреттинг-коррозии в контактной паре металл-металл достаточно перемещения поверхностей относительно друг друга с амплитудой 0,025 мкм. Этому виду изнашивания подвержены все металлические поверхности пар трения. Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язв и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка.

Вследствие малой амплитуды перемещения соприкасающихся поверхностей повреждения сосредоточиваются на небольших площадях действительного контакта. Продукты изнашивания не могут выйти из зоны контакта, в результате возникает высокое давление и увеличивается их действие на основной металл.

При фреттинг-коррозии относительная скорость перемещения соприкасающихся поверхностей небольшая. Так, в случае гармонических колебаний с амплитудой 0,025 мкм и частотой 50 с⁻¹ максимальная скорость достигает 7,5 мм/с, а средняя скорость — 2,5 мм/с.

При увеличении амплитуды колебательного движения и частоты площадь поражения фреттинг-коррозией увеличивается. Установлено, что верхним пределом амплитуды для возбуждения фреттинг-коррозии является амплитуда 2,5 мм.

Фреттинг-коррозия протекает не только в атмосфере воздуха и агрессивных газовых сред, но и в нейтральных газах и даже в вакууме. Однако следует отметить, что интенсивность изнашивания в воздушной и агрессивных газовых средах выше, чем в среде нейтральных газов и вакууме.

Таким образом, фреттинг-коррозия представляет собой особый вид разрушения металлов и их сплавов в различных нейтральных и агрессивных средах при одновременном воздействии механических и химических факторов. Обуславливающие протекание это-

го процесса взаимные микроперемещения сопрягаемых контактных поверхностей совершаются вследствие деформации контактов под нагрузкой в виде контактного давления и их вибрации, а также колебаний, происходящих в упругих системах РЭА. Контактующие поверхности могут повреждаться вследствие фреттинг-коррозии даже в то время, когда узел, в который входит электрический соединитель, находится в нерабочем состоянии, но подвергается вибрации, возбуждаемой соседними рабочими узлами.

Продукты фреттинг-коррозии накапливаются в виде мельчайших порошков, содержащих металлические частицы. В случае самопроизвольного выхода вышеуказанных продуктов износа из зоны трения в электрическом соединителе может возникнуть критическая ситуация, связанная с уменьшением сопротивления изоляции, появлением электропроводящих мостиков на поверхности изолятора, и в конечном счете — возникновения короткого замыкания, то есть полного нарушения работоспособности электрического соединителя.

При сочленении-расчленении соединителей в процессе эксплуатации предусматривается проведение определенных регламентных работ, в том числе и удаление продуктов износа с рабочих поверхностей контактов путем протирки их спиртом, очистки щетками, обдувки воздухом и т. д. Процесс же 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 пока мало внимания.

Механизм фреттинг-коррозии

При фреттинг-коррозии протекают следующие процессы. Под действием сил трения кристаллическая решетка поверхностных слоев при циклических тангенциальных смещениях расшатывается и разрушается. Процесс разрушения представляет собой диспергирование поверхности без удаления продуктов изнашивания. Оторвавшиеся частицы металла подвергаются быстрому окислению. Дополнительным источником повреждения поверхностей может явиться возникающее местами схватывание сопряженных металлов контактов.

Упрощенная схема процесса фреттинг-коррозии в начальной фазе такова: перемещение и деформация поверхностей под действием переменных касательных напряжений — коррозия — разрушение окисных и других пленок — обнажение чистого металла и местами схватывание — разрушение очагов схватывания и адсорбция кислорода на обнаженных участках.

Образование окисных пленок на металлической поверхности или продуктов изнашивания в виде окислов изменяет характер протекания процесса, который начинает определяться не только физико-химическими свойствами материалов пары трения в исходном состоянии, но и природой окислов и других образо-

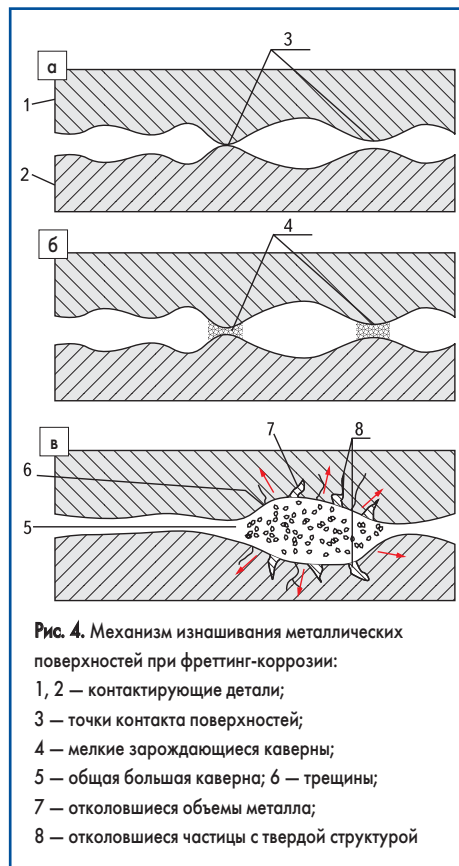


Рис. 4. Механизм изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии:
1, 2 — контактирующие детали;
3 — точки контакта поверхностей;
4 — мелкие зарождающиеся каверны;
5 — общая большая каверна; 6 — трещины;
7 — отколовшиеся объемы металла;
8 — отколовшиеся частицы с твердой структурой

вавшихся химических соединений. Окислению металлов сопутствует увеличение объема окислов. При наличии в сопряжении замкнутых контуров (например, в цилиндрических сопряжениях: гнездовой контакт — втулка, штыревой контакт — круглый стержень) вышеуказанное явление приводит к местному повышению давления, что в свою очередь способствует повышению интенсивности изнашивания и появлению питтингов. Окислы оказывают абразивное действие, которое зависит от прочности сцепления окисных пленок с основным металлом, твердости окислов и размеров их частиц в продуктах изнашивания. Твердость окислов металлов, как правило, выше твердости чистых металлов.

Механизм изнашивания при фреттинг-коррозии в упрощенном виде показан на рис. 4.

Первоначальное контактирование деталей происходит в отдельных точках поверхности — рис. 4а. При вибрации окисные пленки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие каверны, заполненные продуктами разрушения окисных пленок — рис. 4б, которые постепенно увеличиваются в размерах и сливаются в одну общую большую каверну — рис. 4в. В ней повышается давление окисленных частиц металла, образуются трещины. Некоторые трещины сливаются, и происходит откалывание отдельных объемов металла. Частицы окислов производят абразивное воздействие.

С увеличением давления, а в особенности амплитуды относительных перемещений, скорость изнашивания при фреттинг-коррозии возрастает. Этот рост при повышении давления обусловлен увеличением площади контакта, поражаемой коррозией. Повышение частоты перемещений ускоряет изнашивание,

но, начиная с некоторой частоты, снижается активность факторов, протекающих во времени (окислительные процессы, наклеп и др.) и рост скорости изнашивания уменьшается.

Методы борьбы с фреттинг-коррозией

Универсальных средств борьбы с фреттинг-коррозией нет, или на сегодня пока не найдено. Если исходить из того, что взаимное микроперемещение поверхностей контактов не может быть исключено вследствие упругости материала, то для борьбы с фреттинг-коррозией следует:

- уменьшить микроперемещения;
- снизить силы трения.

Этого можно добиться различными известными способами.

Наконец, уменьшить повреждение от фреттинг-коррозии можно за счет повышения твердости одного из контактов контактной пары. При увеличении твердости одного из контактов уменьшается взаимное внедрение контактов, что снижает интенсивность изнашивания. Кроме того, продукты изнашивания в этом случае меньше по размерам и их абразивное действие слабее.

Заключение

Трение — удивительный феномен природы. Трение изучали со времен Леонардо да Винчи и М. В. Ломоносова и продолжают изучать и сегодня. До настоящего времени трение во многих его аспектах остается загадкой. При трении (и только при трении) одновременно происходят механические, электрические, тепловые, вибрационные и химические процессы. Трение может упрочнить или разупрочнить металл, превратить золото и платину в окислы, отполировать детали или сварить их. Трение является самоорганизующимся процессом, при котором с определенной последовательностью и весьма «разумно» протекают явления, направленные на разрушение поверхности или же, наоборот, на создание целой серии систем, снижающих износ и трение.

Сегодня с трением связана одна из самых острых проблем современности — износ механизмов и приборов. Расходы на их восстановление огромны, причем ежегодно они увеличиваются.

Развитие электротехники придало проблеме повышения долговечности приборов, и в частности электрических соединителей, огромную значимость с точки зрения повышения их надежности и экономии материальных ресурсов. Это позволило не только разработать конструктивные и технологические решения по повышению срока службы приборов и создать рациональные требования к условиям их эксплуатации, но и на базе достижений физики, химии и металловедения заложить основы учения о трении и изнашивании.

Вместе с тем необходимо отметить, что современное состояние теории трения и изнашивания пока не дает конструктору надежных методов расчета сопряженных пар на износ,

на заранее предусматриваемый срок службы. Поэтому при проектировании еще часто приходится использовать статистические данные и накопленный опыт, полученные в результате многолетней работы, по разработке, производству и испытаниям электрических соединителей.

Установлено, что основной причиной потери работоспособности электрических соединителей является износ покрытий контактов, а причиной износа — трение. Поэтому, чтобы увеличить срок службы электрических соединителей, необходимо максимально уменьшить негативное влияние процесса трения.

Самым радикальным способом уменьшения трения, а соответственно и износа, является наличие достаточного количества смазки на трущихся поверхностях контактов. Однако применение традиционных смазок в необходимых количествах увеличивает переходное сопротивление контактной пары и создает условия для снижения сопротивления и электропрочности изоляции соединителя из-за попадания ее на изолятор и адсорбирования на ней различных токопроводящих частиц.

В технике существует понятие — «трение при граничной смазке». При граничной смазке поверхности контактов разделены слоем смазочного материала очень малой толщины (от толщины одной молекулы до 0,1 мкм). Наличие граничного слоя смазки или граничной пленки снижает силы трения по сравнению с трением без смазки в 2–10 раз и уменьшает износ сопряженных поверхностей в сотни раз.

В работах Р. Хольма установлено, что для гранично смазанного контакта смазка увеличивает переходное сопротивление не больше, чем его увеличивает окисная пленка хемосорбированного кислорода. На хорошую проводимость при граничной смазке контактной пары указывается также в работах Р. В. Вильсона.

На нашем заводе уже длительное время производится галтовка штыревых контактов с фторопластовыми кубиками, эта операция приводит не только к снижению шероховатости поверхности штырей, но и создает тончайшую пленку граничной смазки. Переходное сопротивление при этом практически не увеличивается.

Исследования по этому поводу показывают, что для весьма гладких контактов с электролитически полированной поверхностью достаточно смазать мономолекулярным слоем только один контакт контактной пары, чтобы получить $f \approx 0,1$.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для снижения негативных последствий, связанных с трением и соответственно с износом контактных пар, наряду с традиционными способами защиты, о которых шла речь выше, необходимо использовать работу контактных пар в условиях граничной смазки. Для этого необходимо применение принципиально новых смазочных материалов, которые бы удовлетворяли специфическим условиям работы электрических соединителей.

Знания общих вопросов теории трения и процессов изнашивания, как мы установи-

ли, оказывается недостаточным для обеспечения условий длительной безотказной работы электрических соединителей в конкретных условиях эксплуатации, требуется дополнительно изучение специальных разделов физической химии, трибохимии, теории смазки и других разделов науки, связанных с трением и износом.

Литература

1. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968.
2. Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания / Пер. с нем. М.: Машиностроение, 1984.
3. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Киев: Наукова думка, 1984.
4. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976.
5. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия / Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1976.
6. Хольм Р. Электрические контакты / Пер. с англ. М.: Иностранная литература, 1961.
7. Сафонов Л. И., Сафонов А. Л. Анализ физических процессов в контактах // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 6.
8. Сафонов Л. И., Сафонов А. Л. Электролитическое получение серебряных и золотых покрытий повышенной твердости и износоустойчивости // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 7.