

# Фреттинг-коррозия

## и ее влияние на жизненный цикл электрических соединителей

**Современный этап развития техники характеризуется возросшими требованиями по устойчивости аппаратуры к воздействию механических и климатических (внешних воздействующих) факторов (ВВФ). Причем значения параметров, характеризующих ВВФ, постоянно изменяются в сторону ужесточения условий эксплуатации. Аппаратура на основных стадиях своего жизненного цикла подвергается комплексному воздействию температуры, сильно отличающейся от температуры при нормальных климатических условиях (НКУ), повышенной (пониженной) влажности, термоударам, синусоидальной и широкополосной случайной вибрации, механическим ударам, воздействию песка и пыли и т. д.**

**Дмитрий Гаманюк,  
к. т. н.**

Электрический соединитель — это электро-механическое устройство, состоящее из ряда узлов и деталей, которые также подвержены негативному влиянию ВВФ. Интересным представляется рассмотрение воздействия одного из малоизученных у нас ВВФ — фреттинг-коррозии. В общем случае она является следствием комплексного воздействия механических и климатических показателей окружающей среды.

### Фреттинг-коррозия, ее природа и влияние на технические устройства

Фреттинг-коррозия — это форма разрушения металла на границе раздела двух соприкасающихся поверхностей, которые колеблются относительно друг друга [4]. Действующий ГОСТ 5272-68 «Коррозия металлов. Термины» дает следующее определение: «Фреттинг-коррозия — это коррозия при колебательном перемещении двух поверхностей относительно друг друга в условиях воздействия коррозионной среды». Разрушение металла происходит вследствие его атмосферного окисления, однако скорость процесса значительно увеличивается в некоторой зависимости от показателей колебательного движения.

В результате относительного колебательного движения контактирующих поверхностей возникают силы трения, приводящие к истиранию пленок молекулярного кислорода, ранее адсорбированного металлом из атмосферы. В некоторый начальный момент времени это способствует увеличению площади чистого металлического контактирования и, как следствие, снижению переходного сопротивления соединителя. Далее, однако, наличие чистых металлических поверхностей, вкупе с повышающейся вследствие трения температурой, приводит к химическим реакциям окисления контактирующих поверхностей. Вследствие постоянного механического воздействия окислы также не являются защитой от

продолжающегося процесса механико-химического износа контактов. Между токопроводящими частями соединителя образуется достаточно широкий слой окислов, толщина которого с ростом времени эксплуатации может увеличиваться. Это приводит к непрогнозируемому увеличению переходного сопротивления контактов, снижению его стабильности во времени и, как следствие, ухудшению характеристик соединителя в целом.

Разработчики и эксплуатанты соединителей, используя их в нейтральной атмосфере или в вакууме, сталкиваются с явлением фреттинга, то есть механического истирания поверхностей. Это приводит к изменению площади контактирующих поверхностей, а значит, к изменению сопротивления стягивания, сопротивления поверхностных пленок, переходного сопротивления всего контакта в целом и, в конечном итоге, к провоцированию явления самоиндукции с наведением в коммутируемой цепи паразитных сигналов.

Влиянию фреттинг-коррозии подвержены все материалы практически во всех средах и условиях.

Впервые термин «фреттинг-коррозия» был предложен в 1939 г. американскими учеными Томлинсоном, Тропом и Гоудом в работе «Исследование коррозии фреттинга близко соприкасающихся поверхностей». Термин «фреттинг» используется для обозначения разрушения материала вследствие исключительно механических взаимодействий соприкасающихся поверхностей. Проводимые в течение XX века западными учеными многочисленные исследования фреттинг-коррозии привели к выводам о ее негативном влиянии, в том числе и на основную характеристику соединителей — электрическое сопротивление. Так, в 1974 г. Бок и Витли, американские исследователи компании AMP (в настоящее время TYCO), разрабатывающей и производящей электрические соединители, с использованием механического стенда, моделирующего фреттинг, получили результат увеличения электрического сопротивления всех из 36 опытных контактов. При-

чем контактные пары были изготовлены из различных металлов: как цветных, так и черных.

В ряде случаев фреттинг-коррозия даже являлась причиной потери контактирования [2]. В данной работе, в частности, отмечается, что в течение достаточно малого времени воздействия фреттинг-коррозии сопротивление контактов изменилось с начальных значений диапазона тысячных долей Ом до единиц Ом. Контактная группа установки, моделирующей фреттинг-коррозию, в этом случае представляла собой сегмент сферы и плоскость. Зависимость увеличения сопротивления контактной пары от времени фреттинг-коррозии показана на рис. 1. Горизонтальный график соответствует работе контактной пары в смазке. На рис. 1 видно, что за время 30 мин сопротивление возрастает с 5 мОм до 10 Ом при контактном нажатии 50 г. В работе [2] также исследована зависимость увеличения сопротивления во время фреттинг-коррозии от усилия контактного нажатия. Установлено, что с ростом усилия увеличивалось и время достижения повышенного сопротивления. Так, с ростом контактного нажатия в 3 раза время достижения заданного сопротивления при фреттинг-коррозии увеличивалось для оловянной контактной пары примерно в 2 раза.

В 2007 г. японские ученые Ито, Мацushima, Таката и Хаттори исследовали явление фрет-

тинг-коррозии применительно к электрическим контактам слаботочных электрических цепей современной цифровой техники [3]. Для моделирования явления использовалась специальная установка (рис. 2). Конфигурация контакта показана на рис. 3. Основным предметом исследования здесь стала оценка влияния толщины дополнительного покрытия контактной пары и усилия контактного нажатия на скорость роста сопротивления при фреттинг-коррозии. Полученные результаты представлены на рис. 4. Видно, что с увеличением усилия контактного нажатия в три раза достигнутое за одно и то же время сопротивление контактной пары уменьшается минимум на порядок. Что касается толщины защитного покрытия, то полученный результат вначале обескураживает: с ростом толщины покрытия растет и сопротивление контакта в аналогичных условиях. На самом деле этот вывод не однозначный и говорит о слабом изучении предмета. Материалы покрытий могут по-разному переносить фреттинг, поэтому не факт, что в данном случае они являлись защитными.

Общий вывод, который можно сделать на основании анализа двух работ — [2] и [3], заключается в установлении зависимости сопротивления при фреттинг-коррозии от усилия контактного нажатия, толщины пленки защитного покрытия и наличия смазки в контактной зоне.

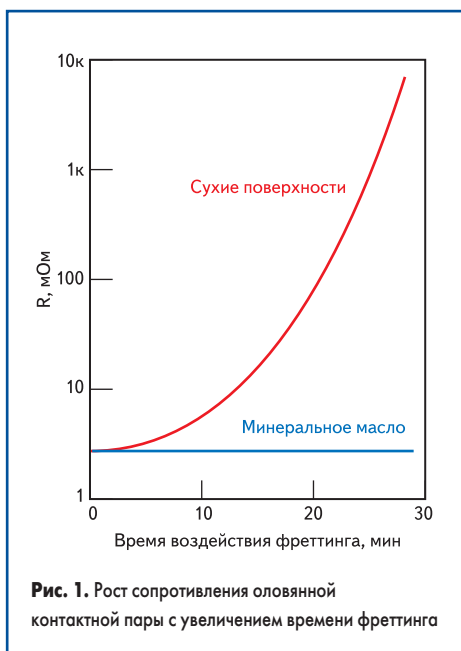
Интересно, что в работах [2] и [3] не проводилось исследование фреттинга в зависимости от формы контактирующих поверхностей. Контактная группа представляла собой пару «сфера – плоскость», что, после начала испытаний, фактически сводилось к контактированию по плоскости. И действующий ГОСТ 23.211-80 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод

испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии» предписывает проводить исследования соприкасающихся плоскостей. Классический справочник [4] дает информацию о степени влияния фреттинга в зависимости от используемых материалов, специфики эксплуатации и условий окружающей среды. Очевидно, установление зависимости фреттинг-коррозии от конструктивных особенностей контактов — предмет дальнейших исследований. Ясно же то, что фреттинг-коррозия минимизируется с увеличением и оптимизацией усилия нажатия в контактной паре. Авторы справочника [4] также в качестве профилактических мероприятий против фреттинг-коррозии рекомендуют минимизировать взаимное перемещение контактов, увеличив силу трения между ними.

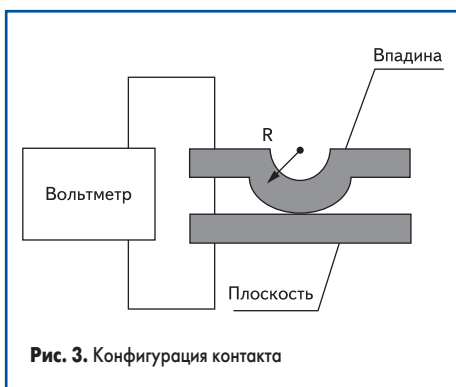
В этой связи интересным будет проанализировать конструктивные особенности электрических соединителей по обеспечению и оптимизации усилия контактного нажатия.

### Конструктивные особенности создания контактного нажатия в электрических соединителях

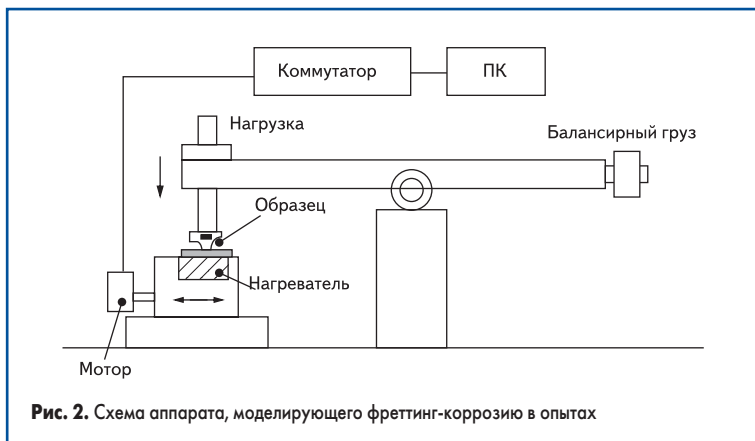
Упругие элементы — неотъемлемая часть абсолютного большинства соединителей и упруго предназначены для обеспечения соприкосновения токоведущих частей. Токоведущие части любого соединителя состоят из штыря и гнезда, где и размещаются упругие элементы. Конструкции контактных устройств постоянно совершенствуются, но, как правило, упругие элементы представляют собой пружины различного вида, принципиальное различие которых заключается в их способе крепления в штыре или гнезде (таблицы 4.1 и 4.2 [1]). Фактически упругий элемент может представлять собой либо консольную балку, закрепленную с одного конца, либо балку, закрепленную с двух сторон. Примером упругого элемента в виде консольной балки может служить стандартный соединитель с пластинчатой пружиной (рис. 5). Характерный пример упругого элемента в виде балки с двумя опорами — соединитель с гиперболическим гнездом, выполненным в виде корзины, состоящей из натянутых упругих проволок (рис. 6). При этом проволока гиперболического гнезда работает не только на изгиб, но и на растяжение.



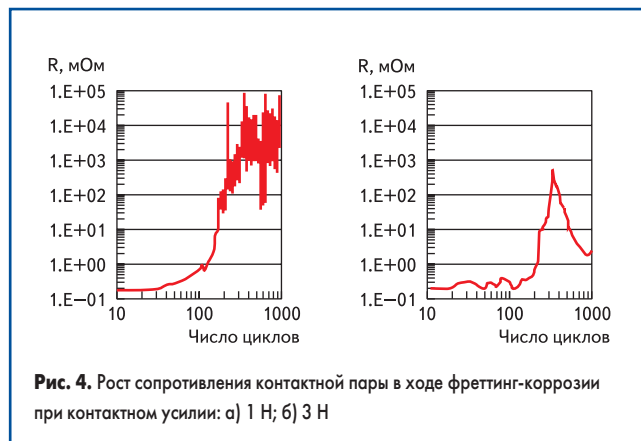
**Рис. 1.** Рост сопротивления оловянной контактной пары с увеличением времени фреттинга



**Рис. 3.** Конфигурация контакта



**Рис. 2.** Схема аппарата, моделирующего фреттинг-коррозию в опытах



**Рис. 4.** Рост сопротивления контактной пары в ходе фреттинг-коррозии при контактном усилии: а) 1 Н; б) 3 Н

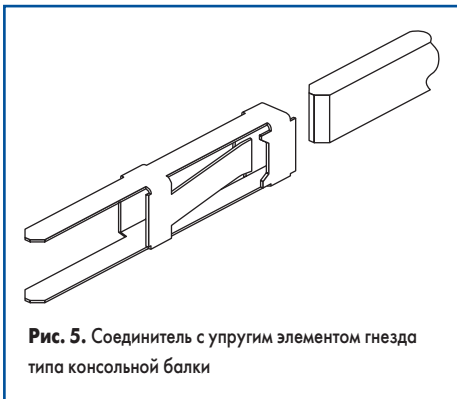


Рис. 5. Соединитель с упругим элементом гнезда типа консольной балки



Рис. 6. Конструкция гиперболического гнезда

Усилие контактного нажатия  $P_k$  в контактной паре электрических соединителей в общем случае определяется выражением (1) [5]:

$$P_k = f \frac{nEI_x}{l^3}, \quad (1)$$

где  $f$  — прогиб упругого элемента, м;  $n$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от вида балки и точки приложения контактного усилия: он равен 3 для консольной балки и 48 для балки на двух опорах с силой, приложенной в центре;  $E$  — модуль упругости 1-го рода, Н/м<sup>2</sup>;  $I_x$  — момент инерции поперечного сечения упругого элемента, м<sup>4</sup>;  $l$  — активная длина упругого элемента, м.

При анализе выражения (1) становится ясно, что при прочих равных условиях усилие контактного нажатия, создаваемые упругими элементами, в 16 раз больше у конструкции в виде балки на двух опорах с результирующей силой, приложенной в ее центре. Эта конструктивная особенность позволяет получать гораздо большие контактные усилия, что, в конечном итоге, кардинально влияет на минимизацию вредных последствий фреттинг-коррозии.

Известно несколько принципиальных конструктивных схем упругих элементов электрических соединителей в виде балки на двух опорах [1], однако схема гиперболической корзины имеет, теперь уже по сравнению с ними, весьма важное преимущество. Оно заключается в гораздо большем числе контактных поверхностей, определяемых числом упругих проволок корзины.

Важнейшей характеристикой любого соединителя является переходное сопротивление — сопротивление зоны соприкосновения контактирующих поверхностей. В общем случае величина переходного сопротивления соединителя определяется выражением [6]:

$$R_{пер} = \rho/2r \text{ — для однотоочечных контактов,}$$

$$R_{пер} = \rho/2rn \text{ — для многотоочечных контактов,}$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление контактного материала, Ом·м;  $r$  — радиус контактной поверхности, м;  $n$  — число контактных поверхностей.

При прочих равных условиях соединитель с гиперболическим гнездом обеспечивает и высокую стойкость к фреттинг-коррозии и минимизирует величину переходного сопротивления, которая к тому же остается стабильной за счет демпфирования внешних механических воздействий.

Кроме того, при использовании соединителей по назначению, во время механической вибрации могут происходить локальные потери контактирования с образованием искровых пробоев воздушных зазоров. Размер и количество мест электрического пробоя обратно пропорционально зависят от усилия контактного нажатия в соединителе. Увеличение температуры контактов в местах электрического пробоя является каталитическим фактором, приводящим к ускорению реакции окисления, что также увеличивает скорость разрушения от фреттинг-коррозии.

Гиперболическое гнездо конструктивно состоит из упругих проволок, причем основания, к которым они крепятся, радиально развернуты относительно друг друга. Такая геометрия гнезда позволяет плотно охватить штырь соединителя по всей его длине, демпфирует внешние механические воздействия и препятствует образованию воздушных промежутков между контактирующими поверхностями.

С целью исключения потери упругости проволок гиперболической корзины, их провисания и ослабления в процессе эксплуатации на стадии проектирования соединителя рассчитывается и закладывается выполнение простых условия [1]:

$$\sigma_y = \sigma_{пр}/n, \quad (2)$$

где  $\sigma_y$  — усталостное напряжение материала пружины, при котором возможна его остаточная деформация — сохранение «растянутого» состояния после расчленения контактной пары;  $\sigma_{пр}$  — реальное напряжение, действующее в пружине в момент максимального растяжения;  $n$  — коэффициент запаса упругости. Обычно его выбирают в пределах 1,5–2.

Таким образом, действующие напряжения значительно меньше усталостных, что и гарантирует исключение остаточных деформаций пружин корзины в течение всего срока службы соединителя.

Впрочем, такая мера применяется при расчетах упругих элементов любых конструктивов, что и позволяет обеспечивать требуемое усилие в течение установленного времени эксплуатации.

## Заключение

Фреттинг-коррозия продолжает оставаться уникальным и чрезвычайно мало изученным

явлением комплексного воздействия внешней среды на электронную (электрическую) аппаратуру различных применений. Многие такие приборы, в частности, медицинские, аэрокосмические, транспортные и т. д., вообще не должны выходить из строя, так как речь идет о здоровье и жизни людей. Проведенный в статье анализ позволяет наметить меры противодействия фреттинг-коррозии в сфере электрических соединителей. Предложены способы минимизации последствий фреттинг-коррозии с помощью конструктивных решений соединителей, так как использование благородных металлов или усложнение технологии изготовления — меры не оригинальные и дорогостоящие. Возможное решение минимизации фреттинг-коррозии основано на использовании в электрических соединителях гиперболического гнезда. Разработчиком и крупнейшим производителем соединителей на этой основе является компания Hypertronics Corporation. Гиперболические соединители этой компании применяются в аппаратуре в транспортной, медицинской, аэрокосмической и военной областях. Надежность и эффективность этих продуктов подтверждается положительными результатами испытаний, эксплуатации, апробированным высоким ресурсом (до 100 000 циклов сочленения/расчленения) [7].

Такой ресурс может быть необходим в следующих приложениях:

- В системах тестирования электронных компонентов (например, высокостабильных кварцевых генераторов, испытываемых в различных режимах) в системах входного контроля производств радиоэлектронной промышленности.
- На испытательных станциях предприятий, где приборы РЭА проходят испытания на влияние ВВФ.
- В медицинских приборах и системах: физиотерапия, мониторы контроля состояния пациентов, аппараты магниторезонансной томографии и т. д.

## Литература

1. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Энергия, 1967.
2. Bock E. M., Whitley J. H. Fretting Corrosion in Electric Contacts. Prepared for Presentation at the Twentieth Annual Holm Seminar on Electrical Contacts. October 29–31, 1974.
3. Ito T., Matsushima M, Takata K., Hattori Y. Factors Influencing Fretting Corrosion of Tin Plated Contacts // SEI Technical Review. No 64. April, 2007.
4. Коррозия. Справочное изд. / Под ред. Л. Л. Шрайера, пер. с англ. М.: Металлургия, 1981.
5. Левин А. П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры (Расчет и конструирование). М.: Советское радио, 1972.
6. Лярский В. Ф., Мурадян О. Б. Электрические соединители / Справочник. М.: Радио и связь, 1988.
7. [www.hypertronics.com](http://www.hypertronics.com)