

УДК 620.178.16. 194; 621.891

А.Н. ПЕТУХОВ

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова
«ЦИАМ», Россия*

ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИЯ И ФРЕТТИНГ-УСТАЛОСТЬ В МАЛОПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ГТД И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАШИН

Рассматриваются механизмы фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости. Приводятся экспериментальные данные по исследованию влияния фреттинга на сопротивление усталости конструкционных материалов, некоторые данные об особенностях напряженного состояния в зоне контакта деталей, подверженных фреттингу усталости.

фреттинг-коррозия, амплитуда относительных перемещений, давление в зоне контакта, фреттинг-усталость, эффективный коэффициент концентрации напряжений фреттинг-усталости

Введение

Фреттинг-коррозия возникает при циклическом нагружении в зоне контакта сопряженных деталей. Амплитуда относительных перемещений в зоне контакта деталей, достаточная для возникновения фреттинга, лежит в пределах упругих деформаций поверхностного слоя детали, а ее максимальная величина не превышает 200 – 300 мкм. Фреттинг-коррозия возникает при контакте металлов и при контакте металлов с неметаллами. Особенно ярко проявляется фреттинг-коррозия в малоподвижных и пресовых соединениях: болтовых, шлицевых, замковых, хиртовых и фланцевых соединениях, в зоне напрессовки подшипников, в электрических контактах и др.

Наиболее тяжелые последствия этого процесса – фреттинг-усталость, т.е. усталостные разрушения деталей, поврежденных фреттинг-коррозией. Предел выносливости, соединения при этом может снижаться в 1,5...3 раза. Несмотря на то, что явление фреттинга находится в поле зрения исследователей более 100 лет, удовлетворительной теории этого процесса до сих пор нет, а прогнозирование сопротивления фреттинг-усталости деталей машин при проектировании, за редким исключением, не делается. В спра-

вочниках сведения о пределах фреттинг-усталости весьма ограничены.

1. Механизм фреттинг-коррозии

Механизм возникновения фреттинг-коррозии относится к наиболее сложным по своей природе процессам [1] изнашивания и кинетики развития повреждений поверхностей в зоне контакта деталей. Механизм фреттинга неоднозначен, всегда сопровождается: 1) механическими разрушениями в субмикроскопических и макроскопических объемах материала в зоне контакта; 2) химическими, когда в зоне контакта образуются окислы поврежденных частиц металлов сопряженных деталей. Оба эти процесса тесно связаны между собой.

В моделях процесса [3] обычно применяют зависимости интенсивности процесса, как функции потерь массы от механических параметров процесса (амплитуды, давления и т.п.); с помощью принципов равновесной термодинамики, учитывают свойства взаимодействующих материалов. Однако указанные модели, использующие методы, применяемые при изучении процессов износа, не позволяют прогнозировать степень влияния фреттинг-коррозии на сопротивление усталости.

Химический фактор при контактном взаимодействии неоднородных конструкционных материалов, оценивается по ряду активности Вольта. Однозначной корреляции между механическими свойствами материалов, например, по параметру твердости, и сопротивлением фреттинг-усталости обнаружить не удается. В частности, при одних и тех же параметрах процесса фреттинга (величине амплитуды относительных перемещений и величине давления сопряженных поверхностей) степень абразивного износа поверхности контакта у стали 13X11H2B2MФ, имевшей твердость НВ = 2800 МПа оказалась выше, чем при твердости НВ = 3100 МПа, а степень снижения предела выносливости оказалась существенно ниже [2, 4]. Это объясняется тем, что в первом случае преобладают процессы абразивного износа, которые способствуют удалению слоев, содержащих усталостные микротрещины. Во втором случае преобладают процессы схватывания материалов, создающие благоприятные условия для образования и развития усталостных микротрещин.

С точки зрения химической активности результаты изучения поведения материалов в искусственно создаваемых условиях окисления и электрохимической коррозии показали, что на разных стадиях фреттинга изменяется характер коррозионных процессов. На начальной стадии преобладают процессы газовой коррозии-окисления, что связано с высокой энергетической активностью свободных ювенильных частиц материала и освобождающейся от окисной пленки поверхности. При избытке кислорода происходит пассивация поверхности. На следующей стадии преобладают электрохимические процессы, когда коррозия из-за катодного деполяризатора (кислорода) усиливается.

Металлографические и металлофизические исследования показывают, что тонкие поверхностные слои в зоне фактического контакта находятся обычно в высокодисперсном состоянии, включающем

ювенильные частицы материала контактирующих пар и их окислы. При этом состав и свойства окислов в зоне контакта при воздействии циклических нагрузок существенно отличаются от окислов, образующихся в стационарных условиях. Так в процессе испытаний на фреттинг-коррозию титановых сплавов (в отличие от других материалов) автору не удалось отметить существенный рост электросопротивления в зоне контакта, в то время как в стационарных условиях электросопротивление в контакте составляло несколько 10^3 Ом. На поверхности контакта у образцов при фреттинге, кроме следов механического воздействия твердых абразивных частиц имелись неупорядоченные следы воздействия вязкой аморфной среды из окислов. Поэтому результаты исследования химического состава окислов вне процесса фреттинга на поврежденных поверхностях нельзя считать объективными, т.к. виды окислов изменяются при фреттинге.

2. Напряженное состояние в контакте

С позиций механики деформирования твердого тела процесс фреттинга является одним из видов контактного взаимодействия твердых тел: контакт полусфер или полуцилиндров при наличии нормальной и касательных составляющих сил от внешней нагрузки и сил трения. В зоне контакта на элементарный объем материала (в условиях трехосного напряженного состояния) будут действовать циклически изменяющиеся напряжения от нормального сжатия и знакопеременных касательных напряжений от сил трения, возникающих на поверхности у границы контакта. Теоретические и экспериментальные исследования [2 – 4, 5], изучение напряженно-деформированного состояния при локальном контакте тел, показывают, что наиболее напряженными (рис. 1) являются две зоны: 1) поверхностный слой, располагающийся на некоторой глубине под цен-

тром постоянного контакта; 2) зона, где касательные напряжения достигают максимума. При некоторых внешних условиях нагружения обе зоны смыкаются, образуя сложное взаимодействие поверхностей при нормальном сжатии, имеющих «проскальзывание» на контактной площадке, где значительно влияние сил трения на напряженное состояние материала в зоне контакта и вблизи нее. Возвратные перемещения поверхностей деталей в зоне контакта сопровождаются циклическими изменениями напряжений во всех микрообъемах материала по площадкам фактического контакта.

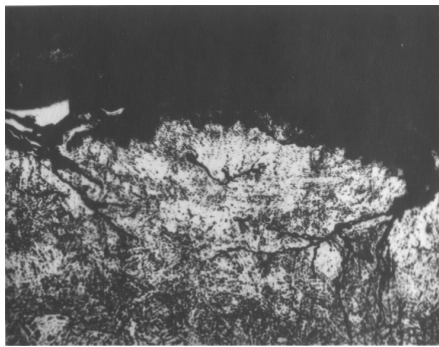


Рис. 1. Характер трещин фреттинг-усталости в центре (зона 1) и у границ контакта (зона 2)

Микро- и макронеровности, существующие на рабочих поверхностях деталей, вызывают значительные изменения контактных напряжений в поверхностном слое площади контакта, которые не учитываются при решении общей контактной задачи. Процесс «проскальзывания» способствует уменьшению местной концентрации напряжений и подобен началу пластической деформации в упругих телах. Преодоление сил трения способствует диссипации энергии, является, с одной стороны, источником конструктивного демпфирования, а, с другой – процессов фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости.

Учитывая дискретность контакта, характерную для реальной шероховатости поверхности деталей, можно утверждать, что в фактическом контакте всегда найдутся микро- и макрообъемы в виде высту-

пов, где максимальные эквивалентные напряжения превысят предел прочности (текучести) материала, или циклическую долговечность, или величину ограниченного предела выносливости. Следовательно, при соответствующем числе циклов нагружения на поверхности контакта будут иметь место статические, квазистатические, малоцикловые или усталостные разрушения материала, которые в сочетании с физико-химическим взаимодействием материалов, могут ускоряться или тормозиться, являясь постоянными источниками образования свободных микрочастиц и окислов, участвуя в разрушении микрообъемов материала, образовании каверн и микротрещин. Возникающие повреждения в микрообъемах поверхностного слоя играют роль концентраторов напряжений или начальных трещин, дальнейшее развитие которых может лишь в отдельных случаях прогнозироваться по законам линейной механики разрушения.

3. Параметры процесса фреттинг-коррозии

Важнейшими параметрами, определяющими интенсивность процесса фреттинг-коррозии, являются: амплитуда относительных перемещений A ; величина давления в зоне контакта P ; частота колебаний при относительных перемещениях v ; число циклов нагружения N ; физико-химические свойства материалов; окружающая среда. К сожалению анализ методик, применявшихся для исследования процесса фреттинга, показывает некорректность многих из них, т.к. в большинстве случаев эти параметры оценивались косвенно, а также полученных при этом результатов.

В работах [4, 7 – 9] для ряда высокопрочных конструкционных сталей и сплавов получены зависимости для коэффициента влияния фреттинг-коррозии на предел выносливости от амплитуды относительных перемещений A_p и от величины дав-

ления в зоне контакта Р. Наибольшее снижение предела выносливости наблюдается при таких сочетаниях A_p и Р, когда в зоне контакта роль абразивных повреждений минимальна при $A_p = 5 - 10$ мкм, наименьшее снижение – при $A_p \gg 20$ мкм. Практически одновременно аналогичные результаты были получены в работе [6] на сталях Ск35, AISI 9310 и 4130.

На интенсивность фреттинга существенно влияет величина коэффициента проскальзывания в зоне контакта, который определяется из выражения

$$f_p = 1 - \frac{A_p}{A_0}, \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда перемещений при $P = 0$; A_p – амплитуда при $P > 0$.

Зависимость между степенью снижения предела выносливости и величиной f_p может быть представлена в виде

$$(K_\sigma^{\text{фр}})^n + f_p^n = 1, \quad (2)$$

$$\text{при этом } K_\sigma^{\text{фр}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1}^{\text{фр}}}; \quad f_p = \eta B; \quad B = (\lg P)^k,$$

где n , η , k – определяются из эксперимента.

Тогда

$$K_\sigma^{\text{фр}} = \left[1 - (\eta B)^n \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (3)$$

Влияние частоты нагружения связано с A_p . При $A_p < 20$ мкм сопротивление усталости не зависит от частоты, при $A_p > 100$ мкм влияние фреттинга на усталость с увеличением частоты ослабевает, что связано с увеличением скорости относительных перемещений и резким возрастанием роли процессов абразивного износа. Для процесса фреттинга типично чередование максимумов и минимумов повреждения материала. В то же время общие закономерности влияния повреждения материалов фреттингом на сопротивление усталости обнаруживаются при $N_p = 10^5$ циклах нагружения.

Исследования значений $K_\sigma^{\text{фр}}$ для алюминиевого сплава ДИБ в паре с различными материалами и соответствующих им значений электродных потенциалов φ_3 , показали, что с повышением потенциала φ_3 величина $K_\sigma^{\text{фр}}$ уменьшается, но однозначной зависимости между $K_\sigma^{\text{фр}}$ и φ_3 не обнаружено. Сложность оценки влияния на усталость свойств материала сопряженных пар заключается в том, что на интенсивность повреждения поверхности контакта в значительной мере оказывают влияние свойства образующихся окислов. Например окись меди почти вдвое, окислы никеля – втрое, магния, титана или железа – в 10 раз, а алюминия почти в 100 раз выше твердости основного материала, что выше твердости закаленных или азотированных сталей. Когда их твердость оказывается более высокой, чем твердость основного материала, они играют роль абразива. Окислы с низкой твердостью оказываются твердой смазкой и защищают поверхность от разрушения.

4. Испытания на фреттинг-усталость

Наибольшее распространение при исследовании сопротивления фреттинг-усталости получило соединение типа "вал-втулка", нагружаемое плоским или круговым изгибом, растяжением-сжатием, кручением и др. Эти испытания позволяют, в той или иной мере воспроизвести условия нагружения прессовых или малоподвижных соединений. Для некоторых видов нагружения удается при этом получить зависимость, а иногда $\sigma = f(P)$. Такие испытания полезны при выборе технологических и конструктивных способов подавления фреттинг-коррозии и для оценки несущей способности соединения типа «вал-втулка» [4, 5, 7 – 9]. С ростом амплитуды напряжений долговечность детали при испытаниях на фреттинг-усталость увеличивается, а кривая усталости принимает С-образный вид (рис. 2), т.е. зависимость числа циклов нагружения и степень снижения пре-

дела выносливости не выражается монотонной функцией.

Зависимость сопротивления фреттинг-усталости от природы материала сопряженных пар (механических свойств) достаточно сложна, т.к. при фреттинге одновременно и независимо друг от друга могут идти абразивные, адгезионные и усталостные процессы, вызывающие механические повреждения, и структурные изменения на площадках контакта, а также электрохимические процессы, при которых между материалами сопряженных пар или их структурными составляющими могут возникать гальванические пары.

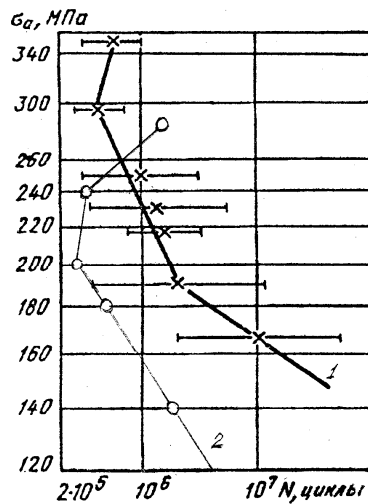


Рис. 2. Виды кривых фреттинг-усталости:
1 – сталь 13X11H2B2MФ; 2 – сплав ВТ8

Кроме титановых сплавов, результаты испытаний образцов и деталей на фреттинг-усталость сближаются, если в результаты испытаний образцов ввести поправки, учитывающие напряженное состояние детали (рис. 3). Отличия результатов испытаний титановых сплавов свидетельствуют, в первую очередь, об особенностях механизма повреждения титанового сплава при фреттинге и при фреттинг-усталости, о чем говорилось выше.

Анализируя результаты испытаний на фреттинг-усталость, можно отметить, что степень снижения предела выносливости детали при фреттинге зависит

от условий нагружения соединения. Когда момент, действующий на соединение, передается от втулки к валу, то в заделке реализуется «жесткое» нагружение. Если момент действует только на вал, то реализуется «мягкое» нагружение. Для «мягкого» нагружения до некоторого критического значения давления в контакте P отмечается тенденция увеличения значений $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ с ростом P . Кроме того, величина $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ может изменяться в зависимости от свойств материала контактирующих пар. Например для стального вала и титановой втулки величина $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ снижается, а для титанового вала и стальной втулки $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ увеличивается.

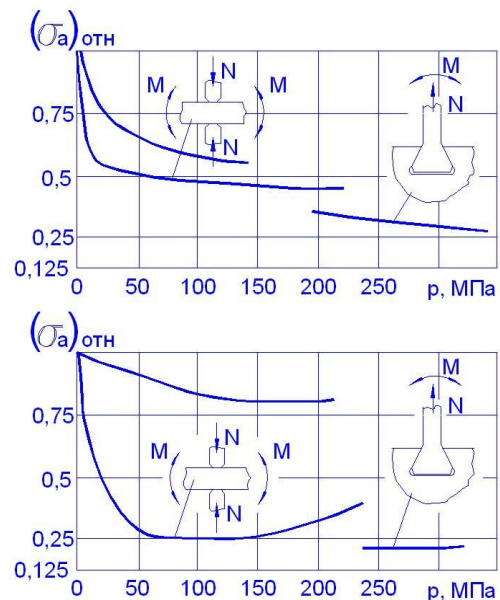


Рис. 3. Зависимости относительной величины предела фреттинг-усталости, полученные при испытаниях на усталость: образцов, поврежденных фреттингом (верхние кривые); образцов по схеме «вал-втулка»; замковых соединений лопаток (верхний рисунок – Ti-сплавы; нижний – стали)

При «жестком» нагружении коэффициент снижения предела выносливости $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ обычно в 1,5 – 3 раза выше, чем при «мягком», а эффективность поверхностных упрочняющих обработок в сочетании с защитными покрытиями достаточно значительна как при нормальных, так и при повышенных температу-

рах. Исследования натуральных элементов ГТД [4, 5, 7 – 9] из титановых сплавов, сталей мартенситного и аустенитного класса, никелевых сплавов в условиях нагружения, которые относятся к «жесткому», показали, что проблема фреттинг-усталости проявляется при любых температурах. Можно отметить, что минимальная повреждаемость фреттинг-усталостью характерна для литых никелевых сплавов с равноосной структурой, а максимальная – для титановых сплавов и лопаток с МОНО структурой. Высокие значения $K_{\sigma}^{фр}$ для этих материалов сохраняются и при повышенных температурах, а изменение предела фреттинг-усталости прямо пропорционально изменению механических свойств материала при повышении температуры.

Вопросы оценки предела выносливости деталей с учетом фреттинг-усталости изложена в работах [4, 5, 9], где показана необходимость учета особенностей напряженно-деформированного состояния детали в зоне контакта, а также приводятся данные о значениях $K_{\sigma}^{фр}$, отражающие также влияние на фреттинг-усталость материала пар в соединениях конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов.

Заключение

Изучение механизма фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости, наличие расчетных и экспериментальных данных о напряженно-деформированном состоянии конструкции позволяют, с одной стороны, прогнозировать реальный предел выносливости детали, а с другой – выбрать научно обоснованные и оптимальные конструктивные и технологические методы, снижающие влияние фреттинг-коррозии на сопротивление усталости узлов, подверженных фреттингу.

Литература

1. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высш. шк., 1991. – 320 с.
2. Петухов А.Н. Методические особенности исследования процесса фреттинг-коррозии в связи с усталостью материалов // В сб.: Физико-химическая механика контактного взаимодействия. Всесоюзная конференция. – К.: КИИГА, 1972. – С. 142 – 145.
3. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. – К.: Техніка, 1974. – 272 с.
4. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение 1993. – 240 с.
5. Петухов А.Н. Метод оценки предела выносливости деталей при фреттинг-коррозии // В сб.: Проблемы прочности и динамики в двигателестроении. Вып. 3. – М.: ЦИАМ, 1985. – С. 225 – 238 (Труды ЦИАМ № 1109).
6. Funk W. Ein Prüfverfahren zur Untersuchung des Einflusses der Reibkorrosion auf die Dauerhaltbarkeit, Materialprüfung, 1969, Bd. 11, № 7. – P. 221 – 260.
7. Филимонов Г.Н., Белецкий Л.Г. Фреттинг в судовых соединениях. – Л.: Судостроение, 1983. – 296 с.
8. Petuckov A.N. Fretting and fretting-fatigue of materials and components «Condition monitoring 94». Edited by M.N. Jones. University College of Swansea // Proceedings of an International Conference on Condition on Monitoring held at University of Wales, U.K. 21st – 25th March, 1994. – Pine ridge press. Swansea U.K. – P. 694 – 704.
9. Петухов А.Н. Проблемы фреттинга и фреттинг-усталости в узлах высоко-нагруженных энергомашин // В сб.: Вторая междуна. конф. «Энергодиагностика и condition monitoring». – М.-Х. – 1998. – Трибология, том 3, ч. 1. – М.: ИРЦ Газпром, 1999. – С. 60 – 80.

Поступила в редакцию 25.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Е.Р. Голубовский, МАТИ им. К.Э. Циолковского, Москва.