

## ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИЯ И ФРЕТТИНГ-УСТАЛОСТЬ В МАЛОПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

© 2006 А.Н. Петухов

ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», г. Москва

Рассматриваются модели механизмов фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости, особенности напряженного состояния в зоне контакта деталей, подверженных фреттингу. Приводятся экспериментальные данные по исследованию влияния фреттинга на сопротивление усталости конструкционных материалов.

Механизм фреттинга по своим характерным признакам относится к наиболее сложным по своей природе процессам. Он, с одной стороны, включает физико-химические процессы, протекающие на молекулярном уровне, вследствие чего в зоне реального контакта образуются окислы металлов сопряженных деталей (фреттинг-коррозия). С другой стороны, он включает механические процессы разрушения и абразивного износа в зоне контакта в субмикроскопических и макроскопических объемах поверхностного слоя деталей. Эти процессы тесно связаны между собой, а преобладание того или иного механизма на различных этапах и при разных соотношениях параметров процесса, как правило, изменяется и по-разному влияет на сопротивление усталости (фреттинг-усталость).

Отделяющиеся при фреттинге мельчайшие частицы материала обладают очень высокой энергией, поэтому для появления окислов достаточно наличие следов кислорода. В большинстве случаев твердость образующихся окислов существенно превышает твердость основных материалов.

Роль химического фактора оценивается по результатам взаимодействия неоднородных конструкционных материалов в различных средах, отличающихся химической активностью, или используется ряд химической активности Вольта [1,2]. Корреляции механических свойств материалов, например, по параметру твердости, с сопротивлением фреттинг-усталости не имеется. В частности, при одних и тех же параметрах процесса фреттинга (величине амплитуды относительных перемещений сопряженных поверхностей и величине давления в зоне контакта) повреждаемость поверхности кон-

такта стали 13X11H2B2MФ в состоянии отпуска на твердость  $HB=2800$  МПа выше, чем при отпуске на  $HB=3100$  МПа, однако степень снижения предела выносливости при этом оказывается существенно ниже [3-6]. Это объясняется преобладанием в первом случае процессов абразивного износа, которые способствуют удалению слоев, где возникают усталостные микротрещины. Во втором - процессы схватывания материалов, благоприятствующие образованию и развитию 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. В начальной стадии преобладают процессы окисления, связанные с высокой энергетической активностью свободных ювенильных частиц материала и освобождающейся от окисной пленки поверхности детали. При избытке кислорода происходит пассивация поверхности. На следующей - преобладают электрохимические процессы, связанные с усилением коррозии из-за катодного деполяризатора (кислорода) [1].

Металлографические и электронно-микроскопические исследования показывают, что тонкие поверхностные слои в зоне фактического контакта находятся в высокодисперсном состоянии, включающем ювенильные частицы и окислы материалов контактирующих пар. При этом состав и свойства окислов в зоне контакта при воздействии циклических нагрузок существенно отличаются от окислов, образующихся

при окислении материалов в стационарных условиях.

Известные предложения о моделях процесса обычно основаны на зависимости интенсивности процесса, как функции потери массы, от механических параметров процесса: скорости относительного перемещения, величины давления в зоне контакта, величины амплитуды перемещений, природы материалов контактирующих пар. Иногда при этом, основываясь на принципах равновесной термодинамики, дополнительно учитывают физические и химические свойства взаимодействующих материалов. Но модели, созданные на методиках изучения процессов износа [1,9], не позволяют прогнозировать влияние фреттинг-коррозии на сопротивление усталости.

Анализ таких методик, применявшихся для исследования процесса фреттинга, показывает некорректность большинства из них, следовательно и получаемых при этом результатов, т.к. значения основных параметров процесса фреттинга (амплитуда, давление и др.) оценивались косвенно. В их основу закладывались традиционные методы изучения механизма износа при трении-скольжении, где степень повреждения оценивалась по изменениям: массы образцов, профиля поверхности контакта и т.д. Работ, в которых исследовались связь между параметрами процесса и сопротивлением усталости, крайне мало.

Если для многих высокопрочных конструкционных материалов наблюдается соблюдение принципа суперпозиции: близость результатов испытаний на усталость образцов, предварительно повреждённых фреттингом, с результатами испытаний на фреттинг-усталость, то для титановых сплавов имеются существенные различия результатов подобных испытаний на усталость. Это свидетельствует об особенностях механизма повреждения титанового сплава при фреттинге и при фреттинг-усталости. Зависимость сопротивления фреттинг-усталости от природы материала сопряжённых пар, их механических свойств, твердости достаточно сложна, т.к. при фреттинге независимо друг от друга имеют место абразивные, адгезионные и усталостные процессы, связанные с механическими по-

вреждениями зон контакта. Кроме того, могут иметь место и электрохимические процессы, при которых между материалами сопряжённых пар или их структурными составляющими могут возникать гальванические пары.

Для ряда высокопрочных конструкционных сталей и сплавов получены [3,11] зависимости для коэффициента влияния фреттинг-коррозии на предел выносливости от амплитуды относительных перемещений  $A_p$  и от величины давления в зоне контакта  $p$ . Наибольшее снижение предела выносливости наблюдается при таких сочетаниях  $A_p$  и  $p$ , когда в зоне контакта абразивные повреждения минимальны при  $A_p = 5 \dots 10$  мкм, а наименьшее снижение - при  $A_p \gg 20$  мкм. Подобные результаты были получены в работе В. Функа на сталях Ск35, AISI 9310 и 4130.

Рассматривая процесс фреттинга с точки зрения механики деформируемого твёрдого тела, можно считать его одним из видов контактного взаимодействия тел, например, как частный случай контакта полусфер или полуцилиндров при наличии нормальной и касательных составляющих. Возникающее в контактах напряжённое состояние является сложным, где действуют одновременно составляющие от нормальных напряжений сжатия и от сил трения, способствующих образованию знакопеременных касательных напряжений.

Таким образом, элементарный объем материала в зоне контакта находится в условиях трехосного напряжённого состояния и подвергается циклическому деформированию. При этом возникает градиент напряжений по глубине слоя.

Теоретические и экспериментальные исследования, связанные с изучением напряжённого и деформированного состояния при локальном контакте тел, показывают, что наиболее напряженными являются две зоны: зона крайнего поверхностного слоя, располагающаяся на некоторой глубине, и зона, где касательные напряжения достигают максимума (рис.1 а). При некоторых внешних условиях нагружения обе зоны смыкаются. При циклическом изменении сил поверхности возникает возвратное проскальзывание в пределах контактной пло-

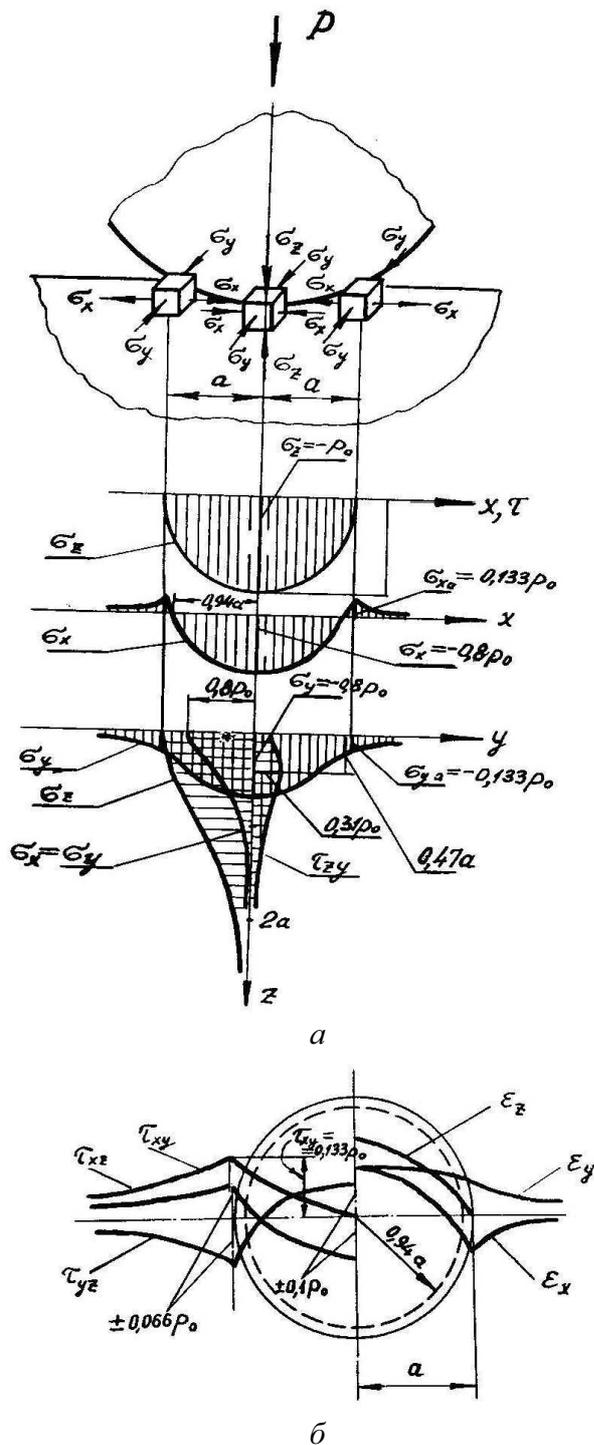


Рис.1. Распределение напряжений (а) и деформаций (б) в зоне контакта шара с полуплоскостью

щадки и значительное воздействие сил трения, способствующее циклическим изменениям напряженного состояния во всех микрообъемах материала по площадкам фактического контакта (рис.1 б). 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 приводит к уменьшению местной концентрации напряжений и подобен началу пластической деформации в упругих телах. Преодоление сил трения способствует диссипации энергии, проявляясь, как источник конструктивного демпфирования и фреттинга.

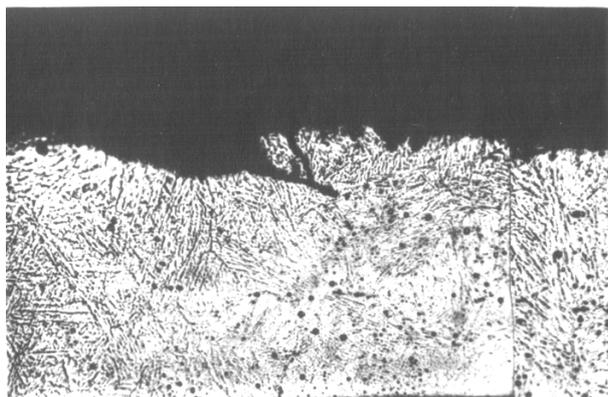
Учитывая дискретность контакта реальных деталей, определяемую шероховатостью поверхности, можно утверждать, что в зоне контакта всегда найдутся микро- и макрообъемы в виде выступов, где максимальные эквивалентные циклические напряжения превысят либо предел прочности материала, либо величину ограниченного предела выносливости. Следовательно, при соответствующем числе циклов нагружения на поверхности контакта будут иметь место статические, квазистатические, малоцикловые и усталостные разрушения материала. Эти процессы в сочетании с физико-химическим взаимодействием материалов, могут интенсифицироваться или тормозиться, являясь постоянными источниками образования свободных микрочастиц и окислов, участвуя в разрушении микрообъемов материала, образовании каверн и микротрещин.

Возникающие повреждения в поверхностном слое играют роль концентраторов напряжений или начальных трещин (рис. 2), дальнейшее развитие которых может в отдельных случаях прогнозироваться по законам линейной механики разрушения.

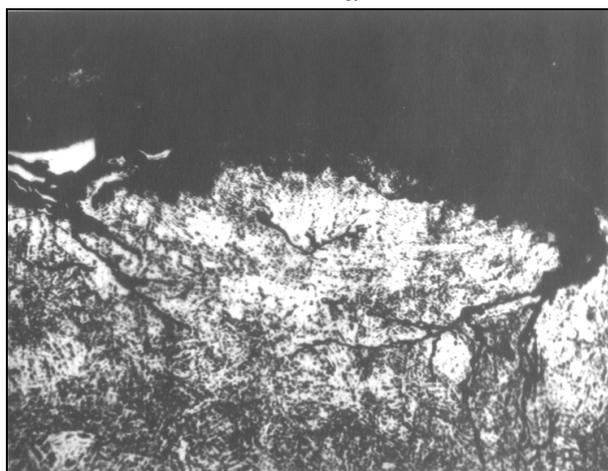
Но результаты экспериментальных исследований показывают, что развитие усталостных трещин, соизмеримых с размерами структурных составляющих материала, не подчиняется закономерностям развития справедливым для сравнительно длинных трещин. Предел выносливости при фреттинге в зависимости от материала контактирующих пар, условий в зоне контакта (наличия покрытий, упрочнения и т.д.) вида нагружения и величины нагрузок может достигать значений  $(0,60 \dots 0,15) \sigma_{-1}$  - предела выносливости обычной многоциклового усталости.

Силовое воздействие в контакте поверхностей (локальные участки при реальном контакте), находящихся, как правило, в

трёхмерном напряжённом состоянии и в условиях возврата колебательных перемещений (изгибных, крутильных поступательных и т.д.), способствует возникновению микро- и макротрещин, которые становятся очагами разрушения от фреттинг - усталости при воздействии на детали даже умеренных по величине переменных напряжений. Твёрдые частицы окислов, взаимодействуя с поверхностью контакта сопряжённых деталей, могут образовать на них каверны.



а



б

Рис.2. Примеры образования усталостных трещин и повреждений при фреттинге в зоне контакта:

- а - поверхностные трещины;
- б - поверхностные и подповерхностная трещины усталости

На рис.3 приведены результаты испытаний образцов, предварительно повреждённых фреттингом, при заданной величине  $p$ . Кривые на рис.3а получены для стали 13X11H2BMФ, на рис.3б - для титанового сплава BT3-1.

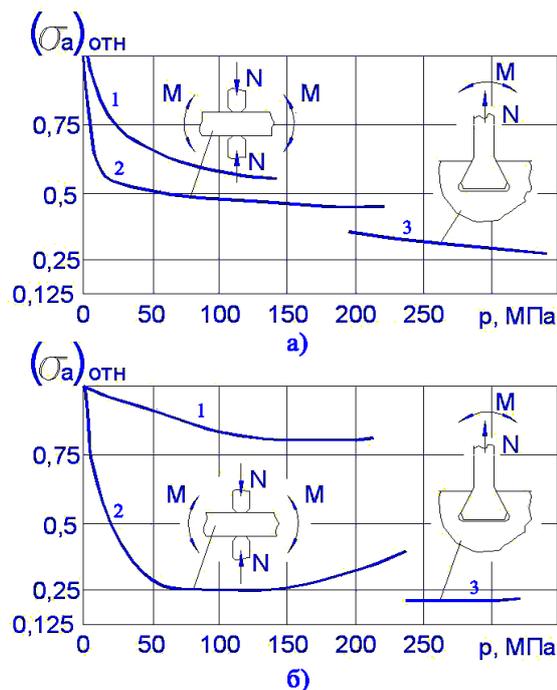


Рис.3. Результаты испытаний на усталость: а) сталь 13X11H2BMФ; б) титановый сплав BT3-1: 1 - образцы, предварительно повреждённые фреттингом; 2-образцов по схеме "вал-штулка"; 3-замковых соединений лопаток компрессоров

Как было сказано, по результатам испытаний образцов, предварительно повреждённых фреттингом (образцов типа вал-штулка и с замковым соединением, которые были изготовлены из стали), можно получить с удовлетворительной точностью представление о зависимости предела фреттинг-усталости от влияния на предел величины давления  $p$  зоне контакта, учитывая особенности напряженного состояния детали, а также об эффективности применяемых технологических мероприятий.

Раздельное испытание на фреттинг с последующим испытанием образцов (деталей) на усталость даёт искажённое представление степени их повреждения.

Разработаны модели оценки прочности поверхностного слоя в условиях реального контакта для различных видов нагружения малоподвижных соединений, включая замковые соединения лопаток компрессоров, знакопеременными нагрузками: при растяжении-сжатии, при кручении и при изгибе, а также методы испытаний на фреттинг-усталость, позволяющие выбрать оптимальные конструктивные и технологические решения

для натуральных деталей, подверженных фреттинг-коррозией [5,6].

Наибольшее распространение при исследовании сопротивления фреттинг-усталости получило соединение типа "вал-втулка", нагружаемое циклическим плоским или круговым изгибом, растяжением-сжатием, кручением и др. Эти испытания позволяют воспроизвести основные условия нагружения прессовых или малоподвижных соединений. Для некоторых видов нагружения можно получить зависимость  $\sigma = f(N; T)$ , 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»

На примере некоторых современных конструкционных материалов, применяемых в энергомашиностроении (теплопрочные стали, сплавы АК4-1, ВТЗ-1, ВТ8, и др.), рассмотрены особенности механизмов фреттинга и фреттинг-усталости. Выявлено существенное влияние на интенсивность процессов фреттинг-износа, фреттинга и фреттинг-усталости соединения типа вал-втулка амплитуды относительных перемещений в зоне контакта, вида нагружения соединения, материала контактирующих пар и т.д. [5,7].

Получены необходимые для прогнозирования пределов фреттинг-усталости значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений  $K_{\sigma}^{фр}$  для малоподвижного соединения типа вал-втулка и замковых соединений из разных пар контактирующих материалов (при нормальной и при повышенной температурах), в том числе с защитными покрытиями и применении методов поверхностной обработки зон контакта [5].

При повышенных температурах проблема фреттинг-усталости сохраняется. Это показали исследования натуральных узлов компрессора двигателей [10,12], изготовленных из различных конструкционных материалов. Условия нагружения этих конструктивных элементов, относятся к «жесткому».

У титановых сплавов отмечена максимальная повреждаемость фреттинг-усталостью, а минимальная - у никелевых. Это объ-

ясняется тем, что в механизме фреттинга для никелевых сплавов преобладающую роль играют процессы износа, где роль абразива играют окислы никеля, при которых начальные усталостные трещины не получают возможности развиваться. Вследствие этого проблема фреттинг-усталости для лопаток турбин, дисков и валов из равноосных никелевых сплавов менее остра, хотя процессы фреттинга в этих деталях имеют место и приводят к изменению геометрических размеров в зонах контакта сопряженных деталей. Вместе с тем, в хвостовиках монокристаллических лопаток турбин, где более ярко проявляется анизотропия механических свойств материала, наблюдались разрушения, связанные с возникновением на площадке контакта очага разрушения от фреттинг-усталости и последующим быстрым развитием трещины по плоскости скольжения кристалла. При этом направление развития трещины определяется именно плоскостью скольжения, а не направлением действия главных напряжений.

Значения  $K_{\sigma}^{фр}$  для высокопрочных конструкционных материалов остаются значительными и при повышенных температурах, а величина предела фреттинг-усталости изменяется пропорционально изменению предела выносливости материала при повышении температуры [3,5,6].

### Список литературы

1. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. г. Киев, "Техника", 1974, 272 с.
2. Петухов А.Н. Методические особенности изучения процесса фреттинг-коррозии в связи с усталостью материалов. Заводская лаборатория, 1974г., №10, с.1246-1250
3. Петухов А.Н. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов с учётом влияния эксплуатационных повреждений фреттингом. Механическая усталость металлов. Матер. VI Международного коллоквиума, Киев, «Наукова Думка», 1983, с.381-386
4. Филимонов Г.Н., Белецкий Л.Г. Фреттинг в судовых соединениях. Л.: "Судостроение", 1983, с. 296.
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 (Тр.ЦИАМ, № 1109).

6. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД.М.: Машиностроение.1993. 240 с.

7. Petuckov A.N. Fretting and fretting-fatigue of materials and components «Condition monitoring 94».Edited by M.N. Jones. Universiti College of Swansea. Proceedings of an International Conference on Condition Monitoring held at. University of Wales, U.K. 21<sup>st</sup>-25<sup>th</sup> March, 1994. Pineridge press. Swansea U.K. p.694-704

8. Петухов А.Н. Проблемы фреттинга и фреттинг-усталости в узлах высоконагруженных энергомашин. Сб.: Вторая международная конференция «Энергодиагностика и condition monitoring» Москва, X- 1998г. Трибология, т.3,ч.1.М., ИРЦ Газпром,1999. с. 60-80

9. Петухов А.Н. О механизме фреттинга и фреттинг-усталости в малоподвижных соединениях деталей машин. Конверсия в машиностроении-Conversion in machine building of Russia. 2002, №4, с.42-47

10. Петухов А.Н. Фреттинг-коррозия и фреттинг-усталость малоподвижных соединений ГТД и энергетических машин. Авиационно-космическая техника и технология №7 (15), 2004, Харьков, «ХАИ», с.128-134

11. Смыслов А.М., Селиванов К.С. Повышение долговечности деталей машин в условиях фреттинга. г.Уфа «Гилем», 2005. 180с.

12. Петухов А.Н. Фреттинг и фреттинг-усталость высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД и ЭУ. Вопросы авиационной науки и техники. Серия.: Авиационное двигателестроение. М.:ЦИАМ 2006. Вып.4 (1328), с.29-58

## **FRETTING-CORROSION AND FRETTING-FATIGUE IN LOW-MOVING JOINTS**

© 2006 A.N. Petukhov

Central Institute of Aviation Motors, Moscow

The mechanisms of fretting-corrosion and fretting-fatigue features of strain-stress state in contact zones of parts under fretting-fatigue are considered. Experimental data of fretting impact study on fatigue resistance of structure materials are given.