

УДК 629.7.015.4

## ВОПРОСЫ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ И ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ГТД

© 2009 А. Н. Петухов

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

Рассматриваются проблемы учёта на этапах выбора конструкционных материалов, особенностей технологии изготовления деталей и эксплуатационных факторов, влияющих на многоцикловую усталость.

*Долговечность, многоцикловая усталость (МнЦУ), фреттинг, фреттинг-усталость, допустимые дефекты, напряжённо - деформированное состояние*

Статистика показывает, что более 60% прочностных дефектов, возникающих при доводке и в эксплуатации ГТД, связаны с усталостными разрушениями [1-3] и вызваны повышенным уровнем вибрационных напряжений. По оценке ВВС США затраты на устранение дефектов в ГТД от МнЦУ составляют сотни миллионов долларов в год.

Важнейшим требованием, предъявляемым к прочностным характеристикам конструкционных материалов для основных деталей ГТД, применяемых при проектировании деталей, является обеспечение статистически достоверных характеристик по критериям длительной прочности, циклической долговечности и многоцикловой усталости МнЦУ, определяемым по параметрам кривых для долговечностей  $N \gg 5 \cdot 10^7$  циклов для среднего значения предела выносливости с вероятностью неразрушения  $\sigma_{-1} - 2 \sigma_p$ .

### Методы и виды испытаний конструкционных материалов для получения достоверных характеристик МнЦУ

При формировании заготовок деталей сложной формы разные зоны заготовок существенно различаются по степени деформации материала (например, ступица, полотно и обод диска), что отражается и на свойствах МнЦУ.

Перед запуском в производство заготовок необходима проверка фактически реализуемых в них прочностных свойств материала в наиболее критичных зонах как с точки зрения последствий последующего технологического процесса, так и условий эксплуатации.

С этой целью из критичных зон заготовки детали, где наиболее резко проявляются последствия воздействия на неё операций

повышенного риска и действуют максимальные эксплуатационные нагрузки, вырезают образцы для определения реальных механических свойств заготовки [3].

Дополнительно отрицательные последствия операций повышенного риска проявляются при действии эксплуатационных нагрузок в сочетании с влиянием окружающей среды и температуры. Следствием этого будет снижение (или потеря) коррозионной стойкости у всеклиматических сталей, длительной прочности, жаростойкости и пластичности у жаропрочных сплавов и др.

Кроме того, в производстве необходима система контроля процесса производства и регламентация параметров поверхностного слоя детали. Поэтому испытания на МнЦУ деталей должны проводиться в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным по напряжённо - деформированному состоянию (НДС) и температуре.

Обычно в качестве объектов испытаний для дорогостоящих натуральных деталей (дисков, валов и др.) используют элементы, вырезанные из наиболее напряжённой зоны конструкции с сохранением поверхностного слоя детали, полученного при её серийной обработке, и критических зон конструкции, включающих пазы, галтели, отверстия и т.п. Допускается проводить исследования на специальных модельных образцах, повторяющих конфигурацию критических элементов. При этом технология их изготовления должна полностью соответствовать технологии изготовления натурной детали [1-4].

Схемы нагружения конструкций элементов, вырезанных из различных частей дисков ГТД, и условия испытаний на МнЦУ (при нормальной или повышенных темпера-

турах) могут быть реализованы:

- при консольном симметричном изгибе элемента ободной части диска турбины;
- 4-х точечном асимметричном изгибе элемента ободной части диска;
- асимметричном консольном изгибе элемента (с сохранением концентраторов напряжений и поверхности) полотна или ободной части диска.

Перед испытаниями необходимо провести расчётную оценку НДС исследуемого элемента методом МКЭ и экспериментальные исследования НДС опасных зон с помощью тензометрирования. Практика показывает, что без опытного определения значений влияния на МнЦУ реальной детали конкретных конструктивных и технологических факторов нельзя с высокой достоверностью прогнозировать её предел выносливости.

Вероятность разрушения деталей с учётом всех силовых факторов должна быть ниже  $1 \times 10^{-7}$  на час полета и удовлетворять требованиям к безопасности на уровне системы полностью. Дополнительно надёжность характеристик МнЦУ для материала должна подтверждаться стендовыми испытаниями двигателя. Полученные при испытаниях результаты оцениваются с применением методов статистического анализа, а характер и виды разрушений - с использованием металлографических и фрактографических методов исследования.

Обязательным условием при испытаниях является необходимость воспроизведения повреждений материала, которые присущи ему в исходном состоянии при наличии:

- типичных допустимых дефектов, связанных с процессами получения полуфабрикатов (литья, штамповки и т.д.) и свойствами поверхностного слоя, характерного для окончательно готовых деталей;
- дефектов, возникающих в процессе эксплуатации от раздельного или совместного воздействия МнЦУ и МЦУ, фреттинга, фреттинг-усталости, повреждений посторонними предметами и т.п.;
- коррозии и других факторов, вызванных окружающими условиями, воздействие которых приводит к снижению характеристик прочности материала (характеристик МнЦУ, МЦУ, термического и термомехани-

ческого нагружения, статической и циклической ползучести, изменения условий работы двигателя и др.).

#### **Методы оценки повреждений, допустимых в эксплуатации**

Степень повреждения материала, которую необходимо учитывать в процессе проектирования, включает анализ результатов расчетов для всех критических условий (с учётом накопленного опыта проектирования и эксплуатации), которые могут ограничивать долговечность материала детали или привести к условиям, требующим введения периодического контроля или замены детали («на крыле» или при ремонте) через установленные интервалы.

При прогнозировании снижения значений свойств материала до уровня минимально допустимых для детали учитывают возможные комбинации амплитуды средних и переменных или эквивалентных значений напряжений для условий сложного (многоосного) напряженного состояния. Для этого необходимо располагать диаграммами предельных амплитуд напряжений, построенными по статистически достоверным результатам испытаний образцов из конкретного материала (с характерной технологией изготовления) при различных асимметриях цикла нагружения с соответствующими концентраторами напряжений и эксплуатационными температурами для долговечностей  $N = 5 \cdot 10^7$  циклов.

Допускаемый уровень переменных напряжений должен обеспечить детали, получившей в эксплуатации повреждение, надёжное продолжение эксплуатации по критериям МЦУ и МнЦУ в течение установленного промежутка между контролями.

Повреждения, накопленные в детали за промежуток между сроками проведения контроля или периодического регламентного обслуживания, должны рассматриваться с точки зрения их влияния на степень снижения МЦУ и МнЦУ материала детали, а также возможных последствий разрушения.

Это требует знания характеристик кинетики развития усталостных трещин (рис.1).

Интенсивное поверхностное упрочнение, увеличивая инкубационный период распространения трещины, сопровождается ростом скорости её развития.

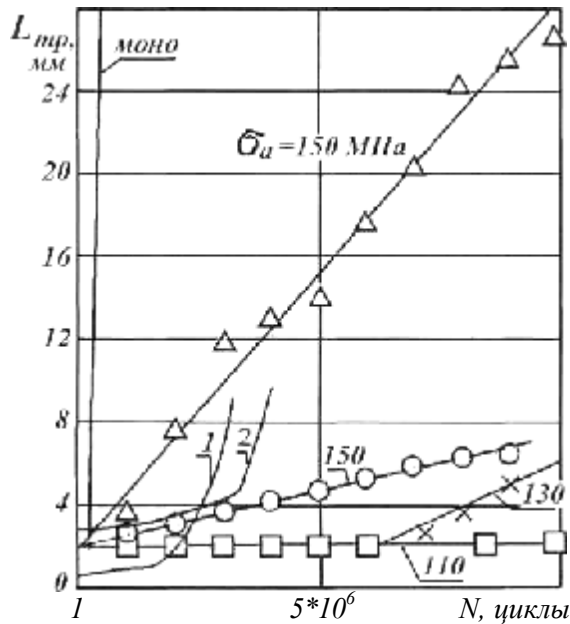


Рис.1. Диаграммы кинетики развития трещин: Сплав ХН77ТЮР: ○, □ - электрополирование; Δ, × - обдувка дробью; 1 - сплав ВТ8; 2 - сталь 13Х1Н2В2МФ

### Влияния фреттинга на МнЦУ деталей

Фреттинг, или фреттинг-коррозия, - это процесс, возникающий при циклическом нагружении в зоне контакта деталей, образующих между собой пресовое или малоподвижное соединение.

Величина амплитуды относительных перемещений деталей  $A_p$  в зоне контакта, достаточная для возникновения процесса, находится в пределах упругих деформаций поверхностного слоя детали.

Минимальная амплитуда  $A_p$ , при которой наблюдается процесс, может не превышать  $100 \text{ \AA}$ , а при  $A_p \approx 200...300 \text{ мкм}$  доминирующим становится процесс фреттинг-износа.

В то же время степень повреждения поверхностного слоя в зависимости от величины  $A_p$  неоднозначна, так как она определяется не только величиной давления в зоне контакта  $p$ , но и свойствами материала контактирующих деталей [3... 7].

При воздействии на малоподвижное соединение эксплуатационных нормальных сил  $N$  и тангенциальных  $F_p$  сопряжённые поверхности смещаются с амплитудой  $\pm A_p$ ; при этом у границ контакта образуются частицы материала повреждённых поверхностей, суб- и микротрещины [5, 10].

Далее эти процессы циклически повторяются, но при этом (рис. 2):

1) увеличивается количество продуктов повреждения контактирующих поверхностей;

2) меняются размеры и места участков активного контакта и зон влияния, а прямой контакт сопряжённых деталей может переходить в контакт через продукты повреждения (износа), возникают и развиваются вне зон контакта каверны ( $a$ );

3) в зонах циклического контакта постоянно возникают условия для образования и развития суб- и микротрещин ( $b$ ,  $в$ ) или абразивного износа, способствующего удалению микротрещин.

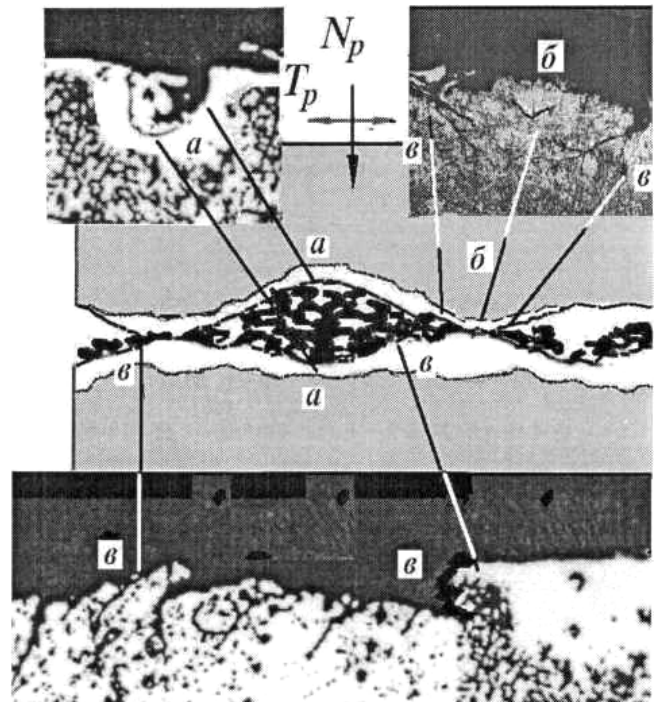


Рис.2. Схема процесса фреттинга и размещения зон с типичными повреждениями в виде образования каверн ( $a$ ), подслоевых ( $b$ ) и поверхностных ( $в$ ) усталостных трещин

Начальные усталостные трещины, являясь потенциально источниками концентрации напряжений и находясь в зоне локального контакта длительное время, могут удаляться абразивными частицами, развиваться до макротрещин и периодически выходить из зоны локального контакта. При этом НДС в этих зонах контакта постоянно изменяется.

В отличие от традиционного процесса износа, когда сопряжённые детали имеют однонаправленное перемещение, при фреттинге однозначной корреляции между механическими свойствами материалов, на-

пример по параметру твердости, и процессом фреттинг-износа или сопротивлением фреттинг-усталости обнаружить не удаётся.

Было показано, что основной причиной разрушения замковых соединений является фреттинг-усталость. Об этом свидетельствуют [3, 5]:

- распределение переменных напряжений на контактной грани, полученные при тензометрировании хвостовика;

- зоны повреждения фреттингом и положение сечения, где группируются разрушения.

Среднее значение эффективного коэффициента концентрации напряжений при фреттинг-усталости для замковых соединений составляет  $K_c^{фр} = 3,5 \dots 4,5 [3 \dots 5, 10]$ .

Установлено, что величина предела фреттинг-выносливости замкового соединения, зависит:

- от механических свойств и природы применяемых материалов;

- конструктивного вида сопряжения выступа диска с хвостовиком лопатки;

- напряжённости поверхности контакта хвостовика, которая в значительной мере определяется углом наклона контактной грани и др.

Именно эти факторы оказывают основное влияние на величину предела фреттинг-выносливости замкового соединения лопаток компрессора ЭУ.

По сравнению с перечисленными факторами менее значимым оказался уровень напряжений смятия: двухкратное его повышение сопровождалось снижением предела фреттинг-выносливости [3,5...7,10], примерно на 10%.

При проектировании и расчёте деталей, образующих малоподвижные или пресовые соединения, в частности замковые соединения типа ласточкин хвост, нередко акцентируют внимание на местных контактных напряжениях, определяемых МКЭ. Однако применение стандартного расчёта МКЭ не позволяет вычислить такие напряжения точно, тем более учесть особенности процесса фреттинг-усталости.

Установлено, что предел фреттинг-выносливости соединения зависит от конструктивного вида сопряжения выступа диска с хвостовиком лопатки, а напряжённость хвостовика и поверхности контакта в значи-

тельной мере определяется углом наклона контактной грани. Именно эти факторы оказывают основное влияние на величину предела фреттинг-выносливости замкового соединения лопаток компрессора.

По сравнению с перечисленными факторами двукратное повышение давления сопровождается снижением предела фреттинг-выносливости [3,5,6] примерно на 10%. Кроме того, при проектировании малоподвижных соединений и расчетах напряжений необходимо учитывать сродство или различие применяемых материалов, изотропию и анизотропию их свойств [8, 9].

### **Внедрение перспективных конструкционных материалов**

Выбранные для применения конструкционные материалы должны:

- быть паспортизованными, т.е. иметь статистически достоверные прочностные характеристики;

- иметь освоенные технологические процессы производства деталей из них;

- подтверждение положительными результатами в условиях производства при их изготовлении;

- положительные результаты применения их при эксплуатации деталей.

Например, к используемым для лопаток турбин современных ГТД монокристаллическим конструкционным материалам предъявляются высокие требования по эксплуатационным свойствам, т.к. деталям из них должны быть гарантированы в течение всего расчётного эксплуатационного ресурса двигателя высокие характеристики по критериям длительной прочности, ползучести, МЦУ и МнЦУ; трещиностойкости (низкой скорости развития трещины), сопротивлению газовой коррозии и коррозии под напряжением; термомеханической усталости и др.

Кроме того, в отличие от лопаток из традиционных изотропных (поликристаллических) материалов, для лопатки из монокристаллов при проектировании необходимо помнить об анизотропии свойств кристалла, которые изменяются по осям ориентации как по главным, так и вторичным [7].

Возможны изменения положения осей

ориентации материала под воздействием на деталь как эксплуатационных нагрузок, так и технологических процессов изготовления, а отклонения основных осей могут превышать  $10^\circ$  от номинального значения.

Отклонения осей ориентации могут сопровождаться снижением сопротивления усталости, характеристик ползучести и скорости роста трещины.

Поэтому ориентация первичных и вторичных осей должна одинаково тщательно контролироваться в процессе производства и учитываться при проектировании детали.

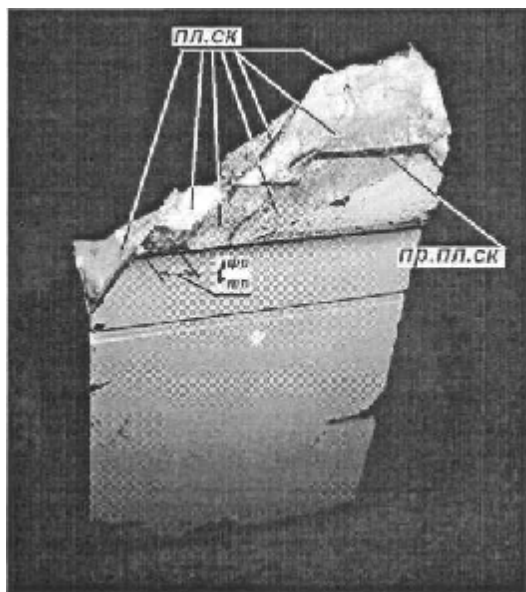


Рис.3. Характер разрушения плоского образца из моносплава

Анизотропия свойств монокристаллов наиболее ярко выражается при умеренных температурах, что в первую очередь проявляется в смешанном характере разрушений, так как наиболее «слабым звеном» оказываются плоскости скольжения, по которым происходит ускоренный рост усталостных трещин в кристалле (рис. 3).

Очагом разрушения явилась начальная трещина от фреттинг-усталости длиной  $l_{\text{фр.тр.}}$ , от которой начались разрушения по плоскостям скольжения (на рис. 3 - *пл. ск.*), а одна из них - продольная (*пр.пл.ск.*).

Подобные разрушения наблюдались при испытаниях образцов и лопаток из моносплавов как при симметричном изгибе (ЖС30) [7, 8], так и при растяжении - сжатии ( $In 100$ ) [9] при умеренных температурах ( $610...650^\circ\text{C}$ ). Это явление обостряет проблему обеспечения сопротивления МНЦУ зам-

ковых соединений лопаток, изготовленных из монокристаллических сплавов, требуя разработки мероприятий, исключающих разрушения сколом, что осложняет вопрос о возможности эффективного применения демпферов для лопаток.

Подобные разрушения вызваны высокой чувствительностью монокристалла к повреждениям, в частности фреттингом, следствием которого при умеренных температурах являются разрушения сколом по плоскостям скольжения. Отсутствие межзёрненных границ, тормозящих развитие трещин, и снижение величины разрушающих напряжений по плоскостям скольжения, примерно в 5 раз, способствуют многократному росту скорости распространения усталостных трещин.

Таким образом, обеспечение отсутствия в эксплуатации разрушений от МНЦУ требует комплексных исследований конструкционных материалов и решения широкого круга проблем, связанных как с МНЦУ, так и с исследованием процессов возникновения, накопления и развития повреждений до критических размеров.

Для эксплуатации ГТД и энергетических машин при наличии в деталях дефектов, не достигающих критических размеров, необходимо применение диагностических средств объективного контроля за кинетикой развития дефектов и обоснованное назначение сроков ревизии опасных зон в конструкции.

#### Библиографический список

1. Кузнецов, Н.Д. Надёжность машин/ Н.Д.Кузнецов//Научные основы прогрессивной техники и технологии. – М.: Машиностроение, 1986. – С.87-97.
2. Кузнецов, Н.Д. Технологические методы повышения надёжности деталей машин: справочник/ Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин.-М.: Машиностроение, 1993. -304 с.
3. Петухов, А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД/ А.Н. Петухов. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.
4. Петухов, А.Н. Многоцикловая усталость материалов и деталей газотурбинных двигателей/ А.Н. Петухов// Проблемы прочности. – 2005. -№3 (375). -С.5-21.
5. Петухов, А.Н. Метод оценки предела выносливости деталей при фреттинг- коррозии/ А.Н. Петухов // Проблемы прочности

и динамики в двигателестроении. - Вып. 3. - М.: 1985. - С. 225 – 238. (Тр. ЦИАМ; № 1109).

6. Петухов, А.Н. Усталость замковых соединений лопаток компрессора/А.Н. Петухов. - М.: ЦИАМ, 1987. (Тр. №1213). -36с.

7. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Шалин Р.Е. [и др.]-М.: Машиностроение, 1997.-336 с.

8. Петухов, А.Н. Физические, технологические и конструктивные аспекты сопротивления многоциклового усталости литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов с заданной кристаллографической структурой/ А.Н. Петухов // Вибрации в технике и технологиях. Киев, 2004. -№5 (37). -С. 6-9.

9. Farris, T.N. High Temperature Fretting Fatigue of Single Crystal Nickel/ T.N. Farris, H. Murthy// Proc.10<sup>th</sup> Nation. Turbine Engine HCF Conference, New Orleans. LA, March 8-11, 2005. -P.123-134.

10. Петухов, А.Н. Механизм фреттинг и фреттинг-усталость высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД и ЭУ/ А.Н. Петухов // Вопросы авиационной науки и техники. Сер.: Авиационное двигателестроение. - М.: ЦИАМ, 2008. (ЦИАМ/ Труды 1338). - 210 с.

#### References

1. Kuznecov N.D. Reliability Machin. M.: Machinostroenie. 1986. P.87-97.

2. Kuznecov N.D., Ceitlin V.I., Wolkov V.I. Technological Method rise of Reliability Component Machin. Reference book. M.: Machinostroenie. 1993. 304 p.

3. Petukhov A.N. High-cycle Fatigue GTE Component. M.: Machinostroenie.1993. 240 p.

4. Petukhov A.N. High-cycle Fatigue Materifls and GTE Component./ Problems of Durablity. 2005, №3 (375). P.5-21

5. Petukhov A.N. Method appraisal Fretting Fatigue Limit Stress Component, // Problems of Durablity and Dynamics GTE. D. 3. M. : CIAM, 1985. (W. /CIAM; № 1109). P. 225 – 238.

6. Petukhov A.N. High-cycle Fatigue join Blede of Compressor. M.: CIAM. 1987(CIAM / W. №1213). 36p.

7. Single Crystal Nickel / Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B. M.: Machinostroenie, 1997. 336 p.

8. Petukhov A.N. Physical, technological and constructional aspect High-cycle Fatigue Component of Single Cystal Nickel. Vibration of Technique and Technology , №5 (37), Kiev.2004. P. 6-9

9. Farris T. N., Murthy H. High. Temperature Fretting Fatigue of Single Crystal Nickel // Proc.10<sup>th</sup> Nation. Turbine Engine HCF Conference, New Orleans. LA, March 8-11, 2005.S.123-134

10. Petukhov A.N. Mechanism Fretting and Fretting Fatigue highladen join GTE. M.: CIAM. 2008. (CIAM / W./ №1338). 210 p.

## QUESTIONS OF HCF FOR MATERIALS AND DETAILS MODERN GTE

© 2009 A. N. Petukhov

Central Institute of aviation Motors, Moscow,

Account problems at stages of a choice of constructional materials of features of manufacturing techniques of details and the operational factors influencing HCF are considered

*Fatigue life, high-cycle fatigue (HCF), fretting, fretting-fatigue, admissible defect, stress deformation state*

#### Информация об авторах

**Петухов Анатолий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, начальник отдела Центрального института авиационного моторостроения. E-mail: [petukhov.an@mail.ru](mailto:petukhov.an@mail.ru). Область научных интересов: процессы фреттинг-усталости и фреттинг-коррозии материалов и деталей.

**Petukhov Anatoliy Nikolaevich**, Professor, department chief “High-cycle Fatigue Materials and GTE Component” of Central Institute of aviation Motors, Moscow. E-mail: [petukhov.an@mail.ru](mailto:petukhov.an@mail.ru). Area of research: fretting, fretting-fatigue, admissible defect, stress deformation state.