



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,  
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251  
Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80  
E-mail: office@spbstu.ru

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## ОТЗЫВ

официального оппонента  
Скотниковой Маргариты Александровны  
на диссертационную работу

**Хаинг Мин**

на тему *«Повышение надежности  
малоподвижных соединений деталей  
авиационных двигателей, подверженных в  
эксплуатации влиянию фреттинг-  
коррозии»*

представленную на соискание ученой  
степени кандидата технических наук по  
специальности 05.07.05 – "Тепловые,  
электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов"  
г. Москва 2015 г.

Диссертационная работа **Хаинг Мин** посвящена разработке комплексной методики повышения эксплуатационной надежности малоподвижных соединений лопаток компрессоров авиационных двигателей, определяющей повышение эффективности систем обеспечения надежности силовой установки летательного аппарата.

В настоящее время явление фреттинга привлекает всё большее внимание отечественных и зарубежных исследователей во всех отраслях машиностроения, особенно в авиации. Это связано с тем, что при эксплуатации под действием циклических нагрузений в лопатках компрессоров авиационных двигателей в зонах контакта поверхностей хвостовика лопатки и паза диска, возникает усталостное разрушение. Влияние фреттинга на зарождение микротрещины и последующее её распространение по механизму усталостного разрушения до сих пор недостаточно изучено.

В связи с вышесказанным, диссертация по повышению надежности малоподвижных соединений деталей авиационных двигателей, подверженных в эксплуатации влиянию фреттинг-коррозии является, безусловно, **актуальной**.

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.**

**Для достижения поставленной цели автором решены следующие задачи:**

- проведён анализ разрушения деталей, подвергающихся воздействию фреттинга;
- определены основные физические параметры влияния процесса фреттинга на сопротивление усталости замков лопаток компрессора;
- разработана физическая модель разрушения замковых соединений в условиях действия фреттинга;
- разработана методика и аппаратное обеспечение исследования замковых соединений лопаток компрессора при действии фреттинг-коррозии;

– разработаны научные и конструктивно- технологические рекомендации повышения сопротивления фреттинг-усталости замковых соединений лопаток компрессора, выполненных из современных конструкционных материалов.

**Научная новизна.** Диссертация имеет научную новизну, основные положения диссертации, выносимые на защиту достаточно обоснованы.

– предложена физическая модель разрушения деталей при фреттинг-коррозионном воздействии в процессе эксплуатации. Установлено, что основными параметрами процесса фреттинга являются:

- амплитуда относительных перемещений сопряженных поверхностей;
- давление в зоне контакта;
- частота циклического смещения сопряженных поверхностей;
- количество циклов нагружения;
- получены зависимости вида  $\sigma_{-1}^{fp} = f(a)$  и  $\sigma_{-1}^{fp} = f(p)$ ;
- методы обработки и особенности поверхности хвостовиков лопаток.

**Достоверность результатов** обеспечивается большим объемом экспериментов, выполненных с привлечением современных методов исследования (стандартных и специально разработанных). Подтверждением достоверности служит наличие значительного массива данных для статистической обработки, а также совпадения результатов, полученных различными способами.

Работа **апробирована** на Всероссийской научно- технической конференции «Новые материалы и технологии» в 2010-2012 годах, на Международной молодежной научно- технической конференции «Гагаринские чтения» в 2009-2011 годах. Результаты диссертационной работы нашли отражение в 11 научных публикациях, из них 3 статьи опубликованы в журналах, включённых в список ВАК: «Авиационная промышленность» и «Двигатель» имеют существенное значение для промышленности.

**Ценность для науки и практики.** Диссертация имеет научную и практическую ценность содержит решение задачи, имеющей существенное значение для развития одного из научных направлений энергомашиностроения и авиации.

Решаемую автором важную народнохозяйственную проблему можно сформулировать, как разработка комплексной методики испытаний для повышения эксплуатационной надежности малоподвижных соединений лопаток компрессоров авиационных двигателей.

1. Полученный комплекс физико-механических и служебных свойств сплавов АК4-1, ВТ8 и стали 13Х11Н2ВМФ в условиях фреттинга, а также замковых соединений, позволил решить задачу обеспечения эксплуатационной надежности малоподвижных соединений лопаток компрессоров авиационных двигателей.

2. В результате исследования показано, что в зоне контакта при относительных перемещениях сопряженных деталей в зависимости от соотношения касательных и нормальных нагрузок могут иметь место:

– интенсивное разрушение поверхности типа абразивного износа со следами первоначального схватывания материала в виде сглаженных каверн и с



выделением у границы контакта значительного количества продуктов окисления поврежденного материала, величина коэффициента трения  $f$  при этом составляет  $0,2 \div 0,4$ ;

– абразивное разрушение с преобладанием процесса схватывания (грубые каверны, налипание материала) и образование продуктов окисления при коэффициенте трения  $f = 0,4 \div 0,55$ ;

– схватывание со следами продуктов окисления контактирующих материалов при коэффициенте трения около  $f > 0,55$ ;

3. Анализ результатов испытаний на усталость сплавов АК4-1, ВТ8 и стали 13X11H2BMФ в условиях фреттинга, а также замковых соединений, выполненных из тех же материалов, показал, что характеристики рассеяния пределов выносливости в этих условиях остаются постоянными и не превышают значений, определяемых для этих материала при испытаниях на обычную усталость;

4. Результаты проведенных исследований являются научной базой при проектировании замковых соединений лопаток компрессоров;

5. Разработанные теоретические и экспериментальные методики, интегральные физические модели обеспечивают повышение сопротивления фреттинг-усталости замковых соединений лопаток компрессоров, валов и др., позволяющие повысить эксплуатационную надёжность компрессоров на этапе проектирования двигателей;

6. Результаты работы могут быть использованы при проектировании двигателей и энергетических установок, а также в учебном процессе авиационных вузов.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Диссертация состоит из введения, *четырёх глав*, заключения, списка литературы из 39 наименований, в том числе 19 на иностранном языке, изложена на 140 страницах, содержит 48 рисунков, 11 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, задано направление исследований, определено научное и практическое значение решаемой проблемы.

**В главе 1** *«Анализ условий, способствующих возникновению процесса фреттинга в малоподвижных соединениях деталей ГТД».*

Представлены литературные сведения по исследуемой проблеме: анализ эксплуатационных характеристик и условий возникновения процесса фреттинга в деталях и узлах ГТД; особенности процесса фреттинга; процесс фреттинга и его влияние на сопротивление усталости; механизм фреттинга и его влияние на сопротивление усталости малоподвижного соединения; условия возникновения процесса фреттинг-коррозии в узлах авиадвигателей. взаимодействие контактирующих поверхностей; особенности образования дефектов и разрушений в конструкциях, связанные с процессом фреттинга. Сформулированы цели и задачи исследования.

**В главе 2** *«Обобщение экспериментальных данных исследований повреждаемости и усталостной прочности компрессорных лопаток и материалов авиационных двигателей».*



Представлены методики, виды образцов и результаты исследования процесса фреттинга и его влияние на сопротивление усталости деталей. Приведены результаты анализа испытаний на МнЦУ стандартных образцов, предварительно поврежденных фреттингом при  $N^{\Phi P}$  и заданных параметрах (давления  $P$  и амплитуды  $A_p$ ) процесса. Следующую партию образцов из тех же материалов автор испытывал на фреттинг-усталость по схеме вал - втулка в условиях «мягкого» нагружения при плоском изгибе. Кривые 3 - испытания моделей замковых соединений лопаток компрессора при жестком нагружении, т. е. при совместном действии статического растяжения и симметричного изгиба, когда в зоне контакта воспроизводятся эксплуатационные условия повреждения фреттингом, а соединение разрушается от фреттинг-усталости.

Из анализа приведенных графиков можно заключить, что в одних и тех же условиях нагружения у образцов и деталей из стали и из титановых сплавов наблюдается различная повреждаемость фреттингом. Удовлетворительное соответствие степени повреждения (качественное и количественное) материала при испытаниях на усталость образцов, предварительно поврежденных в результате фреттинга, и образцов, испытанных в условиях фреттинга, получено для стали 13X11H2BMФ.

Аналогичное совпадение результатов получено также для титанового сплава BT8 при испытаниях по схеме «вал - втулка» и моделей замковых соединений, а испытаниях стандартных образцов выявлена только качественная зависимость изменения предела фреттинг-выносливости. Основная причина некоторого расхождения результатов связана с несколько упрощенной схемой испытаний стандартных образцов по сравнению с моделями, когда условия фреттинг-коррозии действуют постоянно, и с отсутствием статического растяжения.

Результаты испытаний образцов и деталей на фреттинг-усталость практически не отличаются, если ввести поправки учитывающие особенность напряженного состояния деталей.

**В главе 3** «Сопротивление МнЦУ замковых соединений лопаток компрессора».

Представлены результаты испытаний на усталость повреждённых фреттингом образцов, позволяющий получить данные о значении и влиянии исследованных факторов фреттинг-процесса на сопротивление усталости и оценить степень их значимости более простыми испытаниями.

Определённая на этом этапе несущая способность элемента конструкции при переменных нагрузках позволяет, с одной стороны, выявить его прочность в условиях фреттинг-усталости, а с другой - оценить степень приближения и эффективность результатов, получаемых при более простых испытаниях, когда сначала исследуется влияние основных факторов процесса фреттинга на повреждаемость материала, а затем даётся оценка роли этих факторов в снижении предела выносливости повреждённого материала.

Усталостная прочность замковых соединений, а также определение динамической напряженности хвостовиков и профильной части моделей вблизи



хвостовика осуществлялось на разработанных в ЦИАМе испытательных машинах, известных как У-361 и У-362.

**В главе 4** «Разработка физической модели процесса разрушения деталей при воздействии фреттинга».

Представлены результаты исследований напряженно деформированного состояния (НДС) при статическом нагружении замкового соединения типа «ласточкин хвост». Выявлено наличие неравномерности распределения контактных напряжений на рабочих гранях замковых соединений, которая увеличивается при совместном действии на хвостовик изгиба и растяжения от профильной части лопатки. Максимальная величина контактного давления на границах контакта может при этом повышаться примерно в три раза.

Анализ приведённых результатов показывает, что замковое соединение типа «ласточкин хвост», хотя и несложный конструктивный элемент, в эксплуатационных условиях находится в неоднородном (НДС), усугубляемом наличием фреттинга.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

В работе сформулированы 7 основных выводов, достоверность и новизна которых не вызывают сомнения.

1. Предложена физическая модель разрушения деталей при фреттинге в процессе эксплуатации. Установлено, что основными параметрами процесса фреттинга являются: амплитуда относительных перемещений сопряженных поверхностей; давление в зоне контакта; частота циклического смещения сопряженных поверхностей; количество циклов нагружения; природа контактирующих материалов; внешняя среда и температура, а также особенности состояния поверхности и поверхностного слоя.

2. Предложена комплексная методика испытаний образцов и деталей при действии фреттинга. Металлографическими исследованиями образцов, поврежденных фреттингом, показано, что очагами усталостного разрушения материала, как правило, являются трещины, образовавшиеся на участках локального контакта под действием нормальных и касательных нагрузок.

В зоне контакта при относительных перемещениях сопряженных деталей в зависимости от соотношения касательных и нормальных нагрузок могут иметь место:

– интенсивное разрушение поверхности типа абразивного износа со следами первоначального схватывания материала в виде сглаженных каверн и с выделением у границы контакта значительного количества продуктов окисления поврежденного материала, величина коэффициента трения составляет  $f=0,2 \div 0,4$ ;

– абразивное разрушение с преобладанием процесса схватывания (грубые каверны, налипание материала), и образованием продуктов окисления при коэффициенте трения  $f=0,4 \div 0,55$ ;

– схватывание со следами продуктов окисления контактирующих материалов; коэффициенте трения около  $f=0,55$ .

3. Испытаниями материалов лопаток компрессора в условиях фреттинг-коррозии выявлена роль основных факторов процесса фреттинг-коррозии – амплитуды относительных возвратных перемещений и давления – в снижении сопротивления усталости ряда конструкционных материалов:

– получены зависимости вида  $\sigma_{-1}^{\text{фр}} = f(a)$  и  $\sigma_{-1}^{\text{фр}} = f(p)$ ; с учетом влияния фреттинга;

– показано существование некоторого критического диапазона величин амплитуд перемещений и давлений, при которых имеет место наиболее резкое снижение сопротивления усталости исследованных материалов, поврежденных фреттингом при  $A_p = \text{var}$  и  $p = \text{const}$ .

4. Дана оценка несущей способности соединений лопаток с элементами диска при действии фреттинга. Методы ступенчатых испытаний: повреждение фреттингом и последующее испытание на усталость показали, что для титановых сплавов степень повреждения при ступенчатых испытаниях оказывается существенно ниже, чем при испытаниях на усталость в условиях фреттинга.

Для стали 13X11H2BMФ, сплавов ВТ8 и АК4-1 и различных сочетаний пар из этих материалов получены зависимости пределов усталости от величины давлений в зоне контакта в условиях фреттинга.

Величины эффективных коэффициентов концентрации  $K_{\sigma}^{\text{фр}}$  для вероятности разрушения 0,5 с учетом 90% доверительного интервала для среднего значения предела усталости составляют:

– для стали 13X11H2BMФ  $K_{\sigma}^{\text{фр}} = 1,9 \div 2,4$ ;

– для сплава ВТ8  $K_{\sigma}^{\text{фр}} = 2,25 \div 4,25$ ;

– для сплава АК4-1  $K_{\sigma}^{\text{фр}} = 1,4 \div 1,85$ .

5. На металлических моделях двухзамковых соединений типа “ласточкин хвост” в условиях действия статического растяжения и переменного изгибающего момента исследована динамическая нагруженность хвостовика лопатки.

Показано, что в общем случае эпюра изгибающего момента в хвостовике не подчиняется линейному закону, а величина максимального изгибающего момента зависит от:

– вида сопряжения выступа диска с хвостовиком;

– угла наклона контактной грани хвостовика;

– величина максимального изгибающего момента в хвостовике может превышать значение момента в профильной части на 10...35% в зависимости от типа сопряжения хвостовика с выступом диска;

– с ростом статической составляющей величина относительного момента в хвостовике увеличивается, а с ростом податливости профильной части лопатки - уменьшается.

6. Анализ результатов усталостных испытаний сплавов АК4-1, ВТ8 и стали 13X11H2BMФ в условиях фреттинга, а также замковых соединений, выполненных из тех же материалов, показал, что характеристики рассеяния



выносливости в этих условиях остаются постоянными и не превышают значения, определенные для материала при обычных испытаниях на усталость.

7. Наряду с конструктивными мероприятиями, способствующими повышению усталостной прочности замковых соединений целесообразно применение технологических операций сопровождающихся поверхностно пластическим деформированием (методами гидрогалтовки, ультразвуковой обработки), а так же применение «мягких» покрытий (серебрение и др.), которые увеличивают предел усталости на 15÷30%.

**По материалам диссертации можно сделать следующие замечания:**

1. В работе приведены интересные экспериментальные результаты исследований усталостной прочности и повреждаемости материалов авиационных двигателей под действием фреттинга, однако:

- в диссертации отсутствуют электронно-микроскопические снимки с большим увеличением, доказывающие наличие частиц оксидов в поверхностных слоях изломов. А на единственных фотографиях усталостных трещин и повреждений (см. рис. 4.3, стр. 106) нет указаний марки материала и увеличения;

- на рис. 1.2, стр. 25, обсуждаются вопросы упрочнения и разупрочнения материала на разных стадиях его фреттинг-коррозии. При этом не приводится информация, какой была твердость материала в исходном состоянии.

2. В тексте диссертации, автор использует сокращения из 3-х, 4-х букв и не предоставляет пояснения к расшифровке сокращений, например: ГТД (стр.2), НДС (стр.26), МнЦУ (стр.47), ВАП (стр.67), ТСП (стр.129), что затрудняет чтение и восприятие работы.

3. В тексте диссертации и автореферата, автор приводит математическое выражение потери массы при фреттинге с неизвестными параметрами, без их обозначения (см. формула 1, стр. 9 в автореферате и формула 1.2, стр. 31 в диссертации), а так же делает ссылку на работу [44], которой нет в списке литературы. Та же эта формула обсуждается и на стр.20 в диссертации (см. формулу 1.1) со ссылкой на работу [13].

4. Информация из текста диссертации отражена в автореферате не вполне корректно:

- иллюстрация к схеме процесса фреттинг-коррозии, представленная автором в главе 4 диссертации (см. рис.4.2, стр.105), в тексте автореферата размещена в разделе «научная новизна» (см. рис.1 автореферата, стр. 5);

- иллюстрация к физической модели процесса фреттинга, разработанной автором в главе 4 диссертации (см. рис. 4.4, стр.107), в тексте автореферата размещена в главе 1 (см. рис.3 автореферата, стр. 9);

- экспериментальные результаты, описанные автором в диссертации в главе 3 (см. стр. 97, 81, 86) в автореферате представлены в главе 4 (см., соответственно стр. 15, 17);

- в тексте диссертации на стр. 133-134 сформулированы 9 общих выводов, а в тексте автореферата на стр. 20 представлены 7 основных результатов



работы, по содержанию совпадающих с выводами, сформулированными автором в диссертации.

5. В тексте диссертации нет выводов по главам, а в тексте автореферата нет названий глав, что создаёт трудности для восприятия большой информации.

6. В тексте диссертации автор дважды формулирует цель работы и задачи для достижения цели: во введении (стр. 10) и в главе 1 (стр. 45). В первом случае целью работы является разработка комплексной методики повышения эксплуатационной надежности малоподвижных соединений.... Во втором случае целью работы является: выделить и установить роль основных факторов процессов фреттинга и фреттинг-усталости по формированию сопротивления усталости малоподвижных соединений в деталях ГТД.

7. В тексте диссертации и автореферата имеются грамматические ошибки, опечатки, слитное написание слов и выражений и др.

### **Заключение по диссертационной работе:**

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не подвергают сомнению ее основные выводы, которые подтверждены результатами экспериментальных исследований.

По научной и практической ценности, рассматриваемая работа соответствует пункту 9 "Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней", может быть квалифицирована как законченная квалификационная работа. Она выполнена на высоком научном уровне, содержит обоснованные научно-технические решения, отличающиеся существенной новизной.

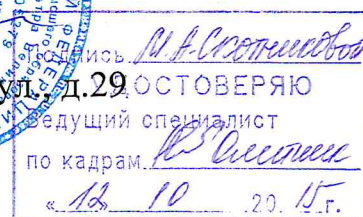
По актуальности, содержанию, значимости в научном и теоретическом плане рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук и соответствует специальности **05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов"**, а ее автор, **Хаинг Мин** заслуживает присуждения ему этой степени.

Официальный оппонент,  
Зав. кафедрой "Машиноведение и основы  
конструирования" института «Металлургии,  
машиностроения и транспорта» СПбПУ  
руководитель лаборатории "Физико-  
технологических исследований  
электронной микроскопии",  
технических наук, профессор



М.А. Скотникова

Адрес: 195197, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29  
Телефон: +7 (921) 987-87-52  
e-mail: Skotnikova@mail.ru



Подпись Скотниковой М.А. заверяю