Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «МАТИ - Российский государственный технологический университет имени. К. Э. Циолковского»

На правах рукописи



Хаинг Мин

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАЛОПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЛИЯНИЮ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ

Специальность 05.07.05 — Тепловые, электроракетные двигатели

и энергоустановки летательных аппаратов

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор ПЕТУХОВ А.Н.

Содержание

Введение			
Глав	а.1 Анализ условий, способствующих возникновению процесса	16	
фреттинга в малоподвижных соединениях деталей ГТД			
1.1	Анализ эксплуатационных характеристик и условий возникновения		
	процесса фреттинга в деталях и узлах ГТД	16	
1.2	Особенности процесса фреттинга	18	
1.3	Процесс фреттинга и его влияние на сопротивление усталости	27	
1.4	Механизм фреттинга и его влияние на сопротивление усталости		
	малоподвижного соединения	30	
1.5	Условия возникновения процесса фреттинг-коррозии в узлах авиадвигателей. Взаимодействие контактирующих поверхностей	34	
1.6	Особенности образования дефектов и разрушений в конструкциях, связанные с процессом фреттинга	39	
1.7	Цели и задачи исследования	44	
1.8	Научно – технические залачи исследования	45	
Глав	а.2 Обобщение экспериментальных данных исследований		
повр	еждаемости и усталостной прочности компрессорных лопаток и	47	
материалов авиационных двигателей			
2.1.	Оценка несущей способности замковых соединений лопаток и рекомендации по их оптимальному конструированию	47	
	2.1.1.Методика исследования процесса фреттинга и влияние его на	40	
	сопротивление усталости деталей	48	
	2.1.2. Выбор и обоснование метода исследования	51	
2.2.	Оценка предела выносливости малоподвижного соединения типа	53	
	«вал-втулка»		
2.3	Влияние эксплуатационных факторов на сопротивление усталости	55	

	замковых соединений при действии фреттинга	
2.4.	Влияние на фреттинг-усталость амплитуды А _р и давления Р	56
2.5	Влияние на сопротивление фреттинг-усталости числа циклов нагружения.	58
2.6	Влияние на сопротивление усталости приролы материалов	59
	2.6.1.Методы определения амплитуды относительных перемещений	60
2.7	и величины нормального давления Влияние на сопротивление усталости окружающей среды и температуры	61
	2.7.1. Изменение электросопротивления в зоне контакта	64
2.8	Методы повышения сопротивления фреттинг-усталости	67
	2.8.1.Электрические методы	68
	2.8.2.Капиллярные методы	68
	2.8.3.Капиллярные дефектоскопы	69
	2.8.4.Экспериментальные методики для исследования зарождения	69
	2.8.5.Расчетные методики для описания развития трещин фреттинг- усталости.	73
	2.8.6.Объекты исследования	77
Глава.3 Сопротивление МнЦУ замковых соединений лопаток 80 компрессора		
3.1.	Влияние на МнЦУ лопаток компрессора особенностей сопряжения хвостовика лопатки с дисковым элементом	80
3.2	Прогнозирование сопротивления усталости замковых соединений лопаток компрессора	83
3.3	Влияние видов конструктивного сопряжения хвостовиков, лопаток и пазов дисков на фреттинг-усталость замковых соединений. Влияние на усталость конструктивных факторов. Роль масштабного	86

фактора		
3.3.1.Влияние на усталость напряжений смятия		
3.3.2.Влияние на усталость технологических факторов		
3.3.3.Влияние на усталость температуры испытаний и мате	риала 90	
3.4 Установки для испытания на усталость замковых соединен	ий 91	
3.4.1. Тарировка установки		
3.5 Исследования напряжённости контактной грани хвосто	вика при	
вибрационном нагружении		
Глава.4 Разработка физической модели процесса разрушени при воздействии фреттинга	я деталей 100	
4.1 Особенности напряженно-деформированного состояния за	МКОВЫХ	
соединений лопаток компрессоров		
4.1.1.Статическое нагружение	100	
4.2 Основы физической модели разрушения деталей в сое ционных двигателей, подверженных действию фреттинга	единениях 103	
4.3 Параметры кривых усталости и обобщенные кривые устало замковых соединений	ости 112	
4.4 Прочность замковых соединений при циклическом нагруже	ении 113	
4.4.1.Конструктивно – технологические методы повышения несущей способности замковых соединений	118	
4.5 Фреттинг-усталость конструкционных материалов, приме прессорах ГТД и ЭУ	няемых в 119	
4.6 Современные защитные покрытия от фреттинга деталей и инений лопаток компрессора	замковых 125	
Общие выводы		
Литература		
Интернет-ресурсы		

Введение

Важнейшим фактором при создании современных ГТД является тенденция роста основных параметров, уменьшение весовых характеристик, увеличение статической и динамической нагруженности элементов конструкций при одновременном повышении их надёжности.

Эти задачи становятся разрешимыми, если в распоряжении конструктора имеются совершенные методы расчёта деталей машин, достаточный объем и достоверные данные о прочностных характеристиках применяемых конструкционных материалов, обладающие необходимыми эксплуатационными свойствами, а также сведений о нагруженности основных деталей в условиях эксплуатации.

Для выполнения таких противоречивых требований необходимы комплексные исследования, связанные с изучением несущей способности деталей и элементов конструкций при действии нестационарных нагрузок и температур, учёт реального спектра действующих на конструкцию циклических и вибрационных нагрузок, влияющих на сопротивление усталости деталей.

Последнее связано с тем, что разрушения деталей в эксплуатации, чаще всего связаны с усталостными разрушениями и являются следствием проявления большого числа факторов, влияющих на сопротивление усталости. К ним относятся технологические факторы, формирующие в процессе изготовления детали (остаточные напряжения, степень наклёпа и др.), определяющие её эксплуатационные свойства, а также силовые факторы, действующие на объемы металла и формирующие градиенты напряженности. Эксплуатационные (температуры, окружающая среда и др.), формирующие напряженное состояние детали и, в конечном счёте, её ресурс.

Сложность учёта даже перечисленных факторов при проектировании конструкций заключается в том, что степень их влияния на усталость не определяется аналитически, а выявляется лишь при накоплении и обобщении большого объема статистически достоверных экспериментальных данных, а также накопленного опыта проектирования и эксплуатации конструкций.

К факторам, определяемым экспериментально, относятся:

- чувствительность материалов концентрации напряжений;

 влияние на сопротивление усталости асимметрии цикла нагружения, применяемых методов обработки;

- окружающей среды и др.

Роль перечисленных факторов в каждом конкретном случае для каждого различна. Кроме того, В процессе материала эксплуатации изделий обнаруживаются и дополнительные факторы, которые влияют на несущую способность конструкций и ответственны за ресурс и разрушения. К ним относятся также коррозионные и эрозионные повреждения, износ, а также повреждения при фреттинге и др. При этом, если многие из перечисленных факторов постоянно учитываются, систематически изучаются в лабораториях прочности, а полученные данные о них приводятся в справочниках, то сведения о процессе фреттинга и особенно фреттинг - усталости материалов и конструкций встречаются ещё редко. Поэтому влияние этого фактора на сопротивление усталости при расчетах на прочность, как правило, не учитывается, хотя предел выносливости детали от повреждений фреттингом может снижаться в $2 \div 5$ и более раз.

Классическими примерами проявления процесса фреттинг-коррозии могут служить повреждения валов на участке прессовой посадки обоймы подшипника на вал, в шлицевых, болтовых, фланцевых и заклепочных соединениях, в замковых соединениях лопаток компрессоров и др. малоподвижных соединениях. Процесс фреттинга возникает в зоне контакта деталей, образующих прессовое или малоподвижное соединение в условиях действия вибрационных и циклических нагружений.

Первая попытка определения физической природы явления фреттинга была предпринята в работе Г.А. Томлинсона, П.Л. Торна и Х.Д. Гафа [9], в

которой авторы в качестве необходимого условия возникновения процесса в зоне контакта определили минимальное значение амплитуды относительных перемещений сопряжённых поверхностей, составляющую 100Å.

Фреттинг наблюдается как при контакте металлических пар, так и металлов с неметаллическими и с композиционными материалами. Отделяющиеся при фреттинге мельчайшие частицы материала, обладая высокой энергией, быстро окисляются, образуя окислы металлов.

Ещё А. Тум и Ф. Вундерлих [13] обратили внимание на образование «фреттинг-коррозии» в заделке при испытаниях на усталость образцов на воздухе, а затем обнаружили и на образцах, погруженных без доступа воздуха в проваренное трансформаторное масло, где содержание кислорода составляло 0.0012%. Как правило, механические характеристики таких окислов существенно отличаются от соответствующих обычных окислов, применяемых материалов деталей.

Исследования [8] фреттинг-усталости замковых соединений лопаток ГТД (они будут подробнее рассмотрены в следующих главах) показали, что процесс фреттинга наблюдается в широком диапазоне температур, превышающих 600°С. Показано, что прочность замковых соединений лопаток компрессора снижается также и при циклическом нагружении [10,14].

Работа выполнена на кафедре «Технология проектирования и производства двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВПО «МАТИ»-Российском государственном технологическом университете имени К.Э.Циолковского.

Актуальность. Тема является то Актуальной так как, что многие усталостные разрушения лопаток компрессоров обусловлены зарождением разрушений в зонах возникновения фреттинга в малоподвижных соединениях (замковые соединения лопаток компрессоров, в зоне напресовки дисков на валы; фланцевые соединения и другие), когда микротрещины образуются в зонах контакта поверхностей, образуются концентраторы напряжений в конечном итоге приводят к усталостным разрушениям. Влияние фреттинга на усталость недостаточно изучено. Поэтому работа Хаинг Мин с этой точки зрения является весьма актуальной.

Проблема предупреждения усталостных разрушений деталей весьма актуальна для всех отраслей машиностроения, особенно для авиации.

Сложность прогнозирования усталостных разрушений деталей связана не только с многообразием факторов, влияющих на конструкционную прочность материалов:

- с особенностями технологического процесса изготовления деталей;

- условиями эксплуатации;

- применяемыми методами конструирования и расчетов;

 сложностью прогнозирования появления опасного уровня переменных напряжений, что относится к специальным задачам.

Максимальное сопротивление усталости детали может быть обеспечено:

 оптимизацией форм деталей за счет уменьшения концентраций напряжений;

 совершенствованием технологического процесса на всех этапах производства, позволяющим максимально реализовать прочностные свойства, заложенные в применяемом материале;

— учетом на стадии проектирования особенностей эксплуатации детали как с точки зрения силового воздействия, так и с точки зрения воздействия окружающей среды.

Создание конструкций, обладающих высокой несущей способностью, требует значительных затрат на испытания на усталость материалов и натурных деталей с привлечением комплексных исследований с участием металлургов, металлофизиков и других специалистов. Однако эти затраты не идут ни в какое сравнение с теми потерями, которые могут иметь место при разрушении летательного аппарата.

Фреттинг - один из факторов, приводящих к усталостным разрушениям

деталей ГТД. Он возникает в малоподвижных соединениях: замковых соединениях лопаток, в болтовых и прессовых соединениях, на площадках контакта антивибрационных полок и др.

Механизм фреттинга по характерным признакам относится к наиболее сложным по своей природе процессам. Это связано с тем, что, с одной стороны, он включает физико-химические процессы, протекающие в зонах контакта деталей на молекулярном уровне, вследствие чего в зоне реального контакта происходит окисление разрушенных частиц металлов сопряжённых деталей.

С другой стороны, процесс фреттинга включает кроме механического разрушения и абразивный износ субмикроскопических и макроскопических объёмов поверхностного слоя деталей в зоне контакта. Эти процессы тесно связаны между собой, а преобладание того или иного механизма на различных этапах и при разных соотношениях параметров процесса может изменяться и по-разному влиять на сопротивление усталости соединения.

Наиболее достоверные сведения о фреттинг-усталости малоподвижных конструкций дают натурные испытания, но они трудоемки и дороги. Экспериментальный материал, полученный на натурных деталях в широком диапазоне температур, дает возможность сделать ряд обобщений, направленных на совершенствование технологических процессов изготовления деталей и их конструктивного облика, а также предложить методы прогнозирования сопротивление усталости деталей ГТД с учетом этих факторов в условиях воздействия переменных нагрузок в процессе эксплуатации.

Традиционные методы изучения механизма износа, когда степень повреждения обычно оценивается по изменениям массы образцов, профиля поверхности контакта, мало пригодны для исследования фреттинга, а тем более для прогнозирования влияния степени повреждений зоны контакта деталей на фреттинг-усталость. **Объектом исследования.** Традиционные методы изучения механизма износа, когда степень повреждения обычно оценивается по изменениям массы образцов, профиля поверхности контакта, мало пригодны для исследования фреттинга, а тем более для прогнозирования влияния степени повреждений зоны контакта деталей на фреттинг-усталость.

Целью диссертационной работы является разработка комплексной методики повышения эксплуатационной надежности малоподвижных соединений, в частности лопаток компрессоров авиационных двигателей, с целью повышения надежности силовой установки летательного аппарата путем разработки и внедрения методики исследования влияния на фреттинг-усталость малоподвижных соединений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научнотехнические задачи:

 проведён анализ разрушения деталей, подвергающихся воздействию фреттинга;

 определены основные физические параметры влияния процесса фреттинга на сопротивление усталости лопаток компрессора;

 предложена физическая модель разрушениядеталей в условиях действия фреттинга;

— разработана методика и аппаратное обеспечение исследования замковых соединений лопаток компрессора при действии фреттинга;

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

Научная новизна и основные положения работы, выносимые на защиту:

 предложена физическая модель разрушения деталей при фреттингкоррозионном 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 $\sigma_{-1}^{\phi p} = f(a)$ и $\sigma_{-1}^{\phi p} = f(p)$;.

– роль технологических методы обработки поверхности хвостовиков лопаток;

- фреттинг-усталости ряда конструкционных материалов;

 предложена комплексная методика испытаний образцов и деталей при действии фреттинга.

Металлографическими исследованиями образцов, поврежденных фреттинг, показано, что очагами разрушения материала, как правило, являются трещины, образовавшиеся на локальных участках контакта под действием нормальных и касательных нагрузок.

Научная новизна заключается в создании комплексной методики исследования процесса фреттинга, выполнены на стандартных образцах при заданных амплитуде относительных перемещений и нормальном давлении получены зависимости влияния предел выносливости поврежденных от относительной при постоянном значении величины перемещений давления в зоне контента и влияния величины давления на придел выносливости при постоянной амплитуде перемещения при постоянной величине давления в зоне кантата.

амплитуда перемещение - А_р, давление - Р

Фрутинг - это процесс, возникающий при циклическом нагружении в зоне локального контакта деталей, образующих между собой прессовое или малоподвижное соединение. Величина амплитуды относительных перемещений A_p в зоне контакта деталей, достаточная для возникновения

процесса, находится в пределах упругих деформаций поверхностного слоя детали.

Минимальная амплитуда A_p , при которой наблюдается процесс, может не превышать 100 нм, а при 200...300 мкм и более 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.

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

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.

Анализ результатов испытаний на усталость сплавов АК4-1, ВТ8 и стали 13Х11Н2ВМФ 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.

Научная новизна и практическая значимость выполненной работы заключается в том, что основные данные о физическом механизме процесса фреттинга получены на стандартных образцах, изготовленных из конструкционных материалов, применяемых для современных лопаток компрессоров.

Поэтому полученные на образцах закономерности влияния основных параметров процесса фреттинга Ap, и р на степень снижения предела выносливости замковых соединений $K^{\phi p}{}_{\sigma}$ будут справедливы и для реальных деталей, что было подтверждено испытаниями моделей замковых соединений.

Достоверность результатов. Полученные при выполнении диссертационной работы результаты обоснованы современными теориями прочности и применением методов вычислительной математики.

Достоверность решения задач в диссертации подтверждена сравнением численных результатов с известными аналитическими решениями и сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов; анализом физического смысла полученных экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1.Хаинг М., Павлов Ю.И. Оценка сопротивления усталости конструкционных материалов в условиях действия фреттинг - коррозии // Двигатель. 2010. № 6. С.20-21.

2.Хаинг М., Петухов А.Н., Павлов Ю.И. Прочность замковых соединений лопаток компрессора при циклическом нагружении // Авиационная промышленность. 2011. № 3. С. 42-45.

3.Хаинг М., Петухов А.Н., Павлов Ю.И. Обеспечение несущей способности замковых соединений лопаток компрессора авиационного

двигателя при действии фреттинг - коррозии // Авиационная промышленность. 2012. №1. С. 55-58.

4.Хаинг М., Петухов А.Н., Павлов Ю.И. Фреттинг - коррозия в деталях ГТД // Труды МАТИ. 2009. № 15. С.102-105.

5.Хаинг М., Петухов А.Н., Павлов Ю.И. Роль контактного взаимодействия деталей при фреттинг - коррозии // Труды МАТИ. 2009. № 16.С. 105-110.

6.Хаинг М., Петухов А.Н., Павлов Ю.И. Алгоритмы экспериментального исследования процесса фреттинга для деталей авиационных двигателей // Труды МАТИ. 2009. №16. С.136-139.

7.Хаинг М. Оценка напряжений в зоне контакта поверхностей деталей ТРД при влиянии фреттинга // Гагаринские чтения международной молодежной научная конференция 2011. № XXXVII. С.210-211.

8.Хаинг М., Петухов А.Н., Павлов Ю.И. Влияние некоторых конструктивных и технологических факторов замковых соединений лопаток компрессора ТРД на их сопротивление усталостному разрушению // Труды МАТИ. 2011. №18. С.65-69.

9.Хаинг М., Петухов А.Н., Павлов Ю.И., Ильинская О.И. Влияние на прочность лопаток компрессора особенностей сопряжения хвостовика лопатки с дисковым элементом // Труды МАТИ. 2011. №18.С.69-74.

10.Хаинг М., Павлов Ю.И. Особенности испытаний лопаток ГТД на усталость // Труды МАТИ2011. №21. С.178-182.

11.Хаинг М., Петухов А.Н., Ильинская О.И. Влияние состояния поверхностного слоя лопаток ГТД на сопротивление усталости // Труды МАТИ. 2013. №21. С.204-207.

Практическая ценность работы. Результаты проведенных исследований являются научной базой при проектировании замковых соединений лопаток компрессоров. 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.

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

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались 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.

Личный вклад автора. Автор непосредственно выполнял все представленные В работе научно-технические расчеты, проводил экспериментальные исследования, принимал участие в разработке моделей и образцов, схем и технологий испытаний, разработке критериев оценки сопротивления фреттииг-усталости замковых соединений лопаток компрессора, с учётом фреттинга.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 11 печатных работ, включая 8 статей, 3 статьи в журналах, включённых в список ВАК:«Авиационная промышленность» и «Двигатель».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов. Полный объем работы составляет 140страниц, в том числе основной текст 135страниц, 48 рисунков,11 таблиц, список литературы из 39 наименований.

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.

Глава 1.

Анализ условий, способствующих возникновению процесса фреттинга в малоподвижных соединениях деталей ГТД

1.1.Анализ эксплуатационных характеристик и условий возникновения процесса фреттинга в деталях и узлах ГТД

Фреттинг возникает в зонах контакта деталей, образующих малоподвижные или прессовые соединения, которые передают вибрационные или циклические нагрузки. Амплитуда относительных перемещений в зоне контакта деталей, достаточная для возникновения фреттинга составляет около 100Å, т. е. находитсяв зоне действия весьма малых упругих деформаций поверхностного слоя. При максимальной амплитуде около и более 200 мкм преобладающими становятся процессы износа. Фреттинг возникает как при контакте металлов, так и при контакте металлов с неметаллами.

Внешний признак фреттинга - скопление окисленных продуктов материалов сопряжённых деталей у границы контакта соединения и в зоне контакта деталей. На поверхностях контакта образуются каверны, микро- и макротрещины, которые при воздействии на детали эксплуатационных нагрузок становятся очагами разрушения от фреттинг-усталости, снижающей предел выносливости в 2...10 раз[5, 22].

В ГТД фреттинг наиболее часто в появляется в замковых соединениях лопаток компрессоров и турбин, на площадках контакта антивибрационных полок лопаток компрессора, бандажных полок лопаток турбин, в болтовых соединениях (в местах болтовых соединений фланцев дисков компрессоров, корпусов и т.д.); в шлицевых соединениях валов и рессор, в местах на прессовки подшипников. В турбинах ГТД, где преобладают никелевые сплавы, фреттинг проявляется, в первую очередь, в виде повреждений площадок

фреттинг- износом контакта бандажных полок лопаток турбин и контактных площадок замковых соединений лопаток и диска.

Сведения о типичных для ГТД разрушениях от фреттинг-усталости хвостовиков лопаток компрессоров приведены в табл. 1.1. Они возникают даже несмотря на наличие во многих случаях на контактных гранях хвостовиков защитных покрытий. Оценка эффективного коэффициента концентрации $K_o^{\phi p}$ показывает, что его значение для хвостовиков составляет около $K_{\sigma}^{\phi p} = 3,5$.

Деформационная податливость пакета деталей, образованного высоконагруженными дисками компрессора и приставками между ними, стянутого призонными болтами, при наложении циклических нагрузок от центробежных сил и вибрационных нагрузок вызывает повреждения Фрутингом поверхностей деталей на стыках соединения, болтах и в отверстиях под болты и последующее разрушение от фреттинг-усталости.

Таблица 1.1

Материал	Вид хвостовика, наличие антифрикционного покрытия
14X17H2	"Ласточкин хвост", $\alpha = 70^\circ$;
13Х11Н2В2МФ	"ласточкин хвост", $\alpha = 70^\circ$;
BT-8	шарнирный, упрочнение + ВАП;
BT3-1	шарнирный, ВАП;
BT8	"ласточкин хвост", $\alpha = 45^{\circ} + Ag$ -серебро гальваническое;
13Х11Н2В2МФ	"ласточкин хвост ", α= 70;
BT8	"ласточкин хвост", α = 45°, лопатка с антивибрационной полкой;
ЭП479	" ласточкин хвост ", (круговой замок);
BT8	" ласточкин хвост ", $\alpha = 60^{\circ}$, упрочнение + Ад гальваническое.

Разрушения замковых соединений лопаток компрессоров от фреттипг-усталости

1.2. Особенности процесса фреттинга

В настоящее время известно несколько описаний моделей фреттинга, но практически ни одна из них не даёт полной характеристики механизма процесса. При этом исследователи нередко высказывают противоречивые мнения. Например, К.Г. Райт считает [25], что малые амплитуды колебаний, ограничивающие выход частиц из зоны контакта наружу, способствуют образованию промежуточного слоя частиц, который, с одной стороны, ослабляет или предотвращает контакт металлических поверхностей, а с другой стороны уменьшает действительное смещение частиц к поверхностям контакта. Образовавшийся при этом промежуточный слой из более твёрдых окислов способствует абразивному износу сопряжённых поверхностей.

При этом многие учёные объясняют эти механизмы фреттинга по-разному, основываясь в первую очередь, на собственных экспериментальных исследованиях, т.к. применявшиеся ими методики, как правило, различались.

Одной из первых была предложена молекулярная теория фреттинга, основоположниками которой явились Д. А. Томлинсон, П. Л. Торп и Х.Д. Гаф. Согласно этой теории на первом этапе фреттинг преимущество имеет молекулярное изнашивание. Суть её состоит в том, что поверхности, находясь в контакте под действием нормальной нагрузкой, могут сблизиться настолько, что входят в пределы молекулярного взаимодействия, в результате чего на поверхностях фактического контакта образуются точки соединения тел с атомной связью. При относительном смещении тел эти связи могут разрушиться с вырывай атомов из решётки кристалла металла и образованием свободных частиц, размеры которых сопоставимы с параметрами атомной решётки, а частицы, обладающие большой энергией, активно окисляются даже при наличии в среде «следов» кислорода.

Молекулярная теория объясняет почему фреттинг наблюдается при ничтожно малом, составляющем 10...100 А́относительном смещении поверхно-

стей [17], т.е. равного четырём межатомным расстояниям. В таких условиях обычный износ невероятен. Однако с помощью этой теории нельзя объяснить, почему размеры частиц, первоначально удаляемые с поверхности, имеют величину от десятков нанометров до нескольких микрометров, что намного больше атомных размеров.

Согласно теории К.Г. Райта [18] на начальном этапе фреттинга в адгезии образуются «мостики» сварки. При относительных результате смещениях эти связи разрушаются с образованием твёрдых частиц на поверхностях неровностей. При последующем смещении тел образовавшиеся могут вызывать микро резание или пластическое оттеснение частицы материала сопряжённой поверхности и дополнительное образование продуктов износа, количество которых зависит от твёрдости поверхностей. Отделившиеся от основного металла частицы при наличии кислорода в зависимости от условий аэрации образуют различные окислы, но малая амплитуда относительных перемещений затрудняет выход окислов из зоны контакта, способствуя скоплению продуктов износа между сопряжёнными поверхностями. Когда толщина зоны продуктов износа достигает равновесного значения, создаются условия скольжения окисла по окислу, выполняющие роль твёрдой смазки, интенсивность износа снижается [19]. Кроме того, К.Г. Райт предполагал возможность внедрения твёрдых частиц износа в металлическую поверхность и образование вследствие этого трещин, которые при действии циклической нагрузки развиваются, что в конечном счёте, приводит к разрушению детали.

Примерно тот же процесс разрушения при фреттинге описывают Г.Г. Улиг и Р.У. Реви в работе [13], но подчёркивая при этом особую связь механических и химических процессов при взаимодействии поверхностей деталей.

Г.Г. Улиг считал, что фретгинг-коррозия представляет процесс непрерывного удаления продуктов химической реакции с металлической поверхности, и предложил формулу для подсчёта потерь массы металла вследствие фреттинга, где учитывает роль механического и химического факторов:

$$W = (k_0 P^{0.5} - k_1 P) \frac{N}{v} + k_2 A_p PN , \qquad (1.1)$$

где

Р — удельная нагрузка;

N — число циклов;

v — частота нагружения;

А_р – амплитуда относительных перемещений, где

 k_0, k_1, k_2 — постоянные.

В этом уравнении первые два члена отражают роль химического фактора процесса, величина которого обратно пропорциональна частоте нагруженный v. Последний член уравнения характеризует механический фактор, связанный прямой зависимостью с амплитудой перемещения. Недостаток этого уравнения заключается в том, что оно не отражает условия в контакте и не учитывает механические свойства контактирующих материалов.

Согласно формуле (1.1) общая потеря массы при фреттинг-коррозии связана линейной зависимостью от числа **N** циклов нагружения, параболической от нагрузки **P** и гиперболической от частоты **v** нагружения.

Анализ формулы показывает, что «коррозионная» компонента уравнения играет преобладающую роль при малых частотах, а при высоких частотах ведущим становится «механический» фактор. Кроме того, коррозионный фактор является функцией времени и не зависит от частоты и общего скольжения, в то время как «механический» находится в прямой зависимости от пути трения.

Предложенная Г.Г. Улитом модель весьма упрощённая, хотя и позволяет учитывать основные факторы процесса фреттинга. Механические и химические факторы в ней находятся в тесной взаимосвязи и поэтому невозможно разделить их влияние на величину износа. Кроме того, модель не учитывает массоперенос и развитие усталостных трещин. Помимо этого при выводе формулы для учёта окислительных процессов сделаны упрощения, искажающие логарифмический закон окисления.

Изучая ранние стадии фреттинг-коррозии, Д. Годфри и И.М. Бейлиз пришли к выводу, что процесс разрушения поверхности и отделение металлических частиц преимущественно происходят в результате сильной адгезии. Величина адгезии зависит от комбинации контактирующих тел, но в любом случае она играет ведущую роль в механическом износе. Хотя металлические частицы, отделяясь от поверхностей трения, быстро взаимодействуют с кислородом, но износ и образование язв на поверхностях неокисляющихся материалов (платина, стекло, кварц, рубин, слюда), по их мнению, свидетельствуют о второстепенной роли химических процессов при фреттинг. В работе обнаружено, что развитие при фреттинге коррозии между различными металлическими материалами со стеклом, а также количество образующихся продуктов износа обратно пропорционально твёрдости материалов.

На начальных стадиях фреттинга адгезия сопровождается разрыхлением поверхности тел, которое выражено тем сильнее, чем больше адгезия, а интенсивность окисления металлических частиц тем выше, чем они мельче. На повреждённых фреттинг-коррозией металлических поверхностях наблюдалось образование плёнок, формирующихся, в результате уплотнения окислов на поверхностях трения.

На основе обобщения результатов известных исследований Р.Б. Уотерхауз выделил основные процессы фреттинга:

— механическое воздействие разрушает на поверхностях контакта окисные плёнки, освобождая чистые поверхности деформированного металла, слой которого энергетически очень активен и быстро окисляется при наличии даже следов кислорода, а этот процесс повторяется в каждом полуцикле нагружения;

— размельчённые в тонкой металлической форме частицы удаляются с поверхности либо путём механического шлифования, либо путём образования

узлов сварки в точках контакта, которые затем разрушаются по иной поверхности, чем первоначальная поверхность контакта (либо путём срезания, либо в результате локального развития усталостных процессов).

Эти процессы наблюдаются в нейтральной среде и в вакууме: окисленные продукты разрушения, образующиеся на первом этапе процесса или в результате окисления металлических частиц на втором этапе процесса, служат абразивом, если твёрдость окислов выше чем, основного материала, выполняют роль фактора, повреждающего поверхности контакта.

К.Г. Райт и Р.Б. Уотертаун сделали вывод, что при фреттинге одновременно протекает несколько процессов: окислительный, абразивный износ, развитие усталостных трещин, которые тесно взаимодействуют между собой делят процесс на три стадии:

1) отделение частиц повреждённого материала;

2) окисление этих частиц;

 взаимодействие окисленных частиц (продуктов повреждения фреттингом) с основным материалом.

Особую трактовку процессам, происходящим при фреттинг-коррозии, дали И.А. Одинг и В.С. Иванова [6], изучавшие влияние на фреттинг-усталость различных металлических и материалов газовой среды (воздуха и водорода).

На основе полученных данных они сделали вывод, что ведущим процессом при фреттинг-коррозии является не окисление поверхностей, а совокупность механических и электроэрозионных процессов. Первые вызывают разрушение окисных плёнок и образование ювенильных поверхностей металла, а вторые приводят к износу поверхностей в результате электроэрозии. Этот процесс, образуя электрическое поле в зоне трения, протекает при трении и обусловливает повышение контактной температуры, возникший градиента на поверхности металла генерирует электродвижущую силу (ЭДС).

В процессе циклического смещения поверхностей при трении происходит последовательное смыкание и размыкание контактов по шероховатостям, т. е.

последовательное образование электрических зарядов и разрядов. Это ведёт к разрушению поверхностей подобно электроэрозионной или электроискровой обработке. Это предположение подтверждалось тем, что при компенсации термотока внешним электротоком удавалось исключить эффект электроэрозии при фреттинг-коррозии.

Для объяснения полученных результатов В.С. Иванова и И.А. Одинг предложили «вакансионный» механизм электроэрозионного разрушения, согласно которому при вырывании с поверхности атомов анода на их место начинают диффундировать атомы и «вакансии» диффундируют вглубь.

С увеличением концентрации «вакансий» создаются благоприятные условия для их коагуляции и образования пор.

Б.И. Костецкий [2] считает, что ведущим при фреттинге является динамический характер нагружения при малых перемещениях, способствующий повышению физико-химической активности поверхностей контакта и интенсивности разрушения взаимодействующих поверхностей. Однако из практики известно, что фреттинг наблюдается в широком диапазоне частот и, более того, с ростом частоты нагружения влияние степени повреждения фреттинга на сопротивление усталости уменьшается.

Трёх стадийную схему предложили также А.Я. Алипьев и Н.Л. Голего [3] (рис. 1.1) развития процесса фреттинга: в первом периоде возникают деформации и схватывание поверхностей контакта, срезание узлов схватывания и микронеровностей, окисление и накопление первичных продуктов повреждения зон контакта и влияния.

Во втором периоде усталостно-окислительные процессы прогрессируют в зонах влияния и в диспергированных слоях, обладающих высокой энергией, что, кроме того, способствует интенсификации абразивного фреттинг-износа.

В третьем периоде происходит износ разрыхлённых усталостно-окислительными процессами зон влияния. Поэтому в соответствии с данными исследований [3] роль усталостных процессов заключается лишь в разрушении ослабленных окислительными процессами поверхностей контакта и активизации фреттинг-износа; при этом авторы не выделили как важнейшую проблему процесса фреттинг-усталости, приводящую к разрушению соединения.

Кроме того, на первой стадии происходит локальное упрочнение поверхностей контакта и циклическая текучесть подповерхностных слоев (рис. 1.1); большая часть выступов фактического контакта, которые, взаимодействуя друг с другом, пластически деформируются. Этому способствует образование схватывания ювенильного металла на локальных неровностях после разрушения естественных оксидных плёнок.



Рис. 1.1. Модель разрушения поверхности при фреттинг-коррозии [3]:
а - стадия I - упрочнения поверхностных слоев; б - стадия II - накопления усталостных повреждений (инкубационный период); в – стадия III - усталостно-коррозионного разрушения поверхности; 1 - высокодисперсный слой: 2 - зона повреждаемости третьего типа; 3 - металлические частицы; 4 - окислы; 5 - зона повреждаемости второго типа; 6 - зона фактического контакта (зона повреждаемости первого типа); 7 - сопряжённая поверхность.

Слои металла, непосредственно прилегающие к участкам локального контакта, вследствие циклического деформирования упрочняются, а слои,

находящиеся в зоне влияния раз упрочняются. Рентгеноструктурный анализ поверхности показал, что на первой стадии процесса продукты разрушения, в основном, содержат металлическую фазу и лишь небольшую часть окислов.

При этом на первой стадии возникновения фреттинг-коррозии на некоторой глубине обнаруживаются раз упрочнённые участки (см.рис. 1.2, кривая 1), что может быть следствием циклической микро- и макро текучести, развивающихся в результате передачи микро выступами знакопеременных напряжений на области, не участвующие в непосредственном контакте (зоны влияния)[3].

На второй стадии возникновения фреттинг-коррозии в подповерхностных слоях продолжает формироваться коррозионно-активная среда вследствие адсорбции на окислах кислорода и влаги. Скорость износа на этой стадии невелика, так как он связан, в основном, с разрушением образующихся на поверхности трения оксидных плёнок, причём количество продуктов износа в зоне трения достигает равновесного значения.



Рис. 1.2. Изменение микро твёрдостиН_м по глубине h поверхностного слоя рамка-железа на различных стадиях фреттинг-коррозии (p = 250 МПа): 1 - I стадия; 2 - II стадия; 3 - III стадия

В этих условиях, вероятно, действует особый механизм интенсификации окисления металлических поверхностей, связанный тем, что С при знакопеременных контактных взаимодействиях в тончайших поверхностных возникает разупорядоченная мелкодисперсная структура, которая слоях образует смешанную структуру (из металла и его окислов) и может играть уменьшая Продукты защитную роль, скорость износа. фреттинга, выделяющиеся из зоны трения, состоят во второй стадии, главным образом, из окисла - α - Fe₂O₃, и кроме того, содержат окислы γ -Fe₂O₃ (Fe₃O₄), коррозионные продукты γ -Fe₂O₃x H₂O, а также металлические частицы.

Эти данные, а также электронно-металлографические исследования позволяют предположить, что при окислении металла в условиях фреттинга вначале образуется низкотемпературный окисел γ -Fe₂O₃, который, имея необходимое кристаллохимическое соответствие с металлом, структурно с ним связан. Потому, отделяясь и попадая в зону трения, где возможно повышение температуры вследствие интенсивного перетирания окислов, имеющих низкую теплоёмкость, окисел γ -Fe₂O₃с кубической структурой превращается в окисел α - Fe₂O₃ с ромбоэдрической структурой.

Рассмотренные примеры позволяют заключить, что ни одна из моделей механизма процесса не является универсальной и, в лучшем случае, объясняют лишь наличие двух ведущих факторов в процессе химического и механического износа.

Как правило, в большинстве рассмотренных моделей не учтены условия НДС материала в зоне контакта и махаон-физико-химические свойства контактирующих поверхностей.

Исследования показывают, что выявленные стадии развития процесса, по существу, неразделимы. Они действуют одновременно и постоянно, хотя их интенсивность на разных этапах процесса может быть различной, а образующиеся окислы, в зависимости от их свойств, могут выполнять функции не только абразива, но и твёрдой смазки. В качестве основного недостатка рассмотренных моделей механизма фреттинга следует отметить отсутствие связи между процессами фреттинга, коррозии и фреттинг-усталости, т.е. степенью снижения сопротивления усталости повреждённого Фрутингом материала.

Остаются нерешёнными следующие важнейшие вопросы:

 при каких условиях и стадиях процесса достигается критическое снижение сопротивления усталости материала;

 – как на интенсивность процесса фреттинга влияют конструктивнотехнологические и эксплуатационные факторы.

Отсутствие ответа на эти вопросы не позволяет разработать универсальные методы защиты от фреттинга и методы повышения сопротивления фреттингусталости.

1.3. Процесс фреттинга и его влияние на сопротивление усталости

При эксплуатации различных машин имеют место усталостные разрушения валов или осей с прессовыми посадками, вызванные процессом фреттинга, но, тем не менее, в качестве основной причины этих разрушений до сих пор ряд специалистов считает, что снижение предела выносливости, связан с концентрацией напряжений К, возникающей на границе контакта втулки и вала. В качестве доказательства приводятся результаты испытаний на усталость моделей осей, где в некоторых случаях наблюдалось совпадение эффективных коэффициентов концентрации на моделях с напрессованными втулками и цельных моделях, повторявших по форме первые.

С повышением прочностных характеристик материала деталей роль процесса фреттинг-коррозии возрастает и становится решающей по сравнению с эффектом концентрации напряжений К от прессовых посадок.

В данной работе и по данным других авторов при симметричном консольном изгибе исследовались ряд современных материалов в условиях

фреттинг и различных окружающих средах: вакууме, водороде, воздушной среде было установлено, что снижение предела усталости имело место во всех средах и достигало $30 \div 50\%$, а окислительные процессы при этом не играли решающей роли. Кроме того, как выше было показано, что степень снижения предела выносливости может завесить и от электрофизических процессов, определяемых природой сопряжённых пар материалов. Тем не менее, наиболее существенное падение сопротивление усталости наблюдается уже при p= $1.0 \div 10$ MΠa, величине нормального давления хотя однозначной зависимости пределов усталости от величины нормального давления в зоне контакта моделей и деталей при этом не обнаружено.



Рис. 1.3. Основные схемы испытаний на усталость в условиях фреттинг-коррозии: а) плоский консольный изгиб (жёсткое нагружения); б) плоский изгиб консольный изгиб (мягкое нагружения); в) плоский симметричный изгиб (мягкое нагружения);

г) консольный изгиб с вращением (жёсткое нагружения); д) консольный изгиб с
вращением (мягкое нагружение); е) растяжение-сжатие (мягкое нагружение);
ж) растяжение-сжатие (мягкое нагружение); з) растяжение-сжатие (жёсткое

нагружение); и) симметричное кручение (жёсткое нагружение); к) симметричное кручение (мягкое нагружение). На рис. 1.3 представлены основные схемы испытаний на усталость в условиях фреттинга, применяемые, для экспериментально-аналитического определения сопротивления фреттинг-усталости значений K_o^{фp}.

Испытывая на усталость в условиях фреттинга титановый сплав в контакте с магниевым, алюминиевыми, медными сплавами, сталью и т.д., получена некоторая корреляционная связь между степенью снижения предела усталости сплава и твердостью сопряженной детали. Однако в целом объяснить, эти результаты простыми соображениями о твердости не удаётся.

Многие исследователи, объясняя причины снижения сопротивления усталости в условиях фреттинг-коррозии, связывают ее с образованием на поврежденных участках каверн, скоплением в зоне контакта, особенно в кавернах продуктов износа и значительным повышением там давления, следствием чего является значительное изменение структурного состояния материалов контактирующих пар.

В настоящее время считается общепризнанным, что ответственным за снижение сопротивления усталости конструкций, имеющих прессовые и малоподвижные соединения, является процесс фреттинг-усталость [23].

При изучении механизма процесса фреттинга и фреттинг-усталости исследователям удавалось получать количественные характеристики процесса (степень повреждения материала по изменению массы образца, глубине повреждения и т.п.) обычно при таких режимах испытаний, когда, например, величина амплитуды относительных перемещений на порядок и более превышала те, которые имеют место в прессовых соединениях или при испытаниях на усталость. Именно этим можно отчасти объяснить отсутствие примеров практического использования большинства накопленных сведений о механизме процесса фреттинг-коррозии.

Общим недостатком испытаний на усталость в условиях фреттингкоррозии является сложность, а порой и невозможность разделения отдельных факторов процесса фреттинга, а также эффекта концентрации напряжений, вызываемой условиями на прессовки в зоне контакта.

Нужно заметить, что при испытаниях вал-втулки (на рис.1.3по схемам II и IV) задавать постоянными условия в зоне посадки намного сложнее, чем при наличии накладок (см. рис.1.3:I и III) в случае плоского изгиба или растяжениясжатия.

Кроме того, существенно отличаются условия нагружения и результаты испытаний, когда оба элемента прессового соединения оказываются несущими (случаи рис.1.3 Ia, IIг, IVи). Для последнего случая величина предела усталости оказывается ниже примерно на 30%.

Испытания на усталость образцов в условиях фреттинга, хотя и не всегда воспроизводят условия нагружения прессовых и малоподвижных соединений, но в целом позволяют получить полезные сведения о прочностных характеристиках материалов при действии процесса фреттинга.

1.4. Механизм фреттинга и его влияние на сопротивление усталости малоподвижного соединения

Механизм фреттинга неоднозначен, так как связан с физико-химическими процессами, протекающими на молекулярном уровне, и с физикомеханическими процессами в субмикроскопических, микроскопических и макроскопических объемах поверхностного слоя контактирующих деталей.

С одной стороны, ОН является результатом взаимодействия контактирующих поверхностей при циклическом нагружения образуются мельчайшие частицы материала, вследствие разрушения элементарных "мостиков сварки", которые интенсивно окисляются даже в присутствии следов кислорода, образуя такие виды окислов, появление которых не может являться результатом химического взаимодействия металла с кислородом в обычных условиях. Если твердость образовавшихся окислов ниже твердости основного материала, то они выполняют роль своеобразной смазки, устраняя прямой контакт взаимодействующих поверхностей. Если твердость окислов выше, то частицы как абразив могут интенсифицировать процесс износа.

Степень повреждения контактирующих поверхностей зависит от основных параметров процесса: давления в зоне контакта, амплитуды относительных перемещений, частоты перемещений, от исходных механиченких, физических и химических свойств материала взаимодействующих тел и от химической активности окружающей среды.

Интенсивность фреттинга, как потеря массы М в зависимости от механических параметров процесса, может быть представлена в виде [44]:

$$M_{o 6 \mu \mu} = M_{\kappa o p} + M_{Mex} = \left(k_0 p^{\frac{1}{2}} - k_1 p\right) N/v + k_2 A p N, \qquad (1.2)$$

где k₀, k₁, k₂ – коэффициенты.

Однако в зависимости(1.2) не нашли отражения температурный фактор, особенности окружающей среды, химические и физико-механические свойства контактирующих материалов.

В.В. Шевеля предложил [20] зависимость для износа при фреттинге, основанную на принципах равновесий термодинамики, имеет вид:

$$I_a = k_1 p N A + (k_2 + k_3 p + k_4 p^2) N / v, \qquad (1.3)$$

где k₁, k₄— функции физических свойств материала и коэффициента трения; k₂, k₃отражают физико-механические и химические характеристики материала.

Однако зависимости (1.2) и (1.3) не позволяют прогнозировать интенсивность процесса фреттинг-усталости.

Роль химического фактора оценивают по результатам исследования взаимодействия неоднородных конструкционных материалов в различных средах, отличающихся химической активностью. При этом в явном виде корреляции между механическими свойствами материалов, например, по параметру твёрдости фреттинг-усталости не получено.

Сравнивая повреждаемость коррозионностойкой стали мартенситного класса 13Х11Н2В2МФ, отпущенной при температурах 650°С и 560°С, можно

отметить, что параметры износа в первом случае более выражены, а снижение предела выносливости оказывается меньше, хотя в первом случае преобладает износ абразивного типа, способствующий удалению слоев с усталостными микротрещинами. Во втором - преобладают процессы "схватывания" материала, приводящие к образованию условий, благоприятных для образования и распространения микротрещин на границах локального контакта сопряжённых поверхностей.

С точки зрения химической активности поведение материалов в условиях окисления и электрохимической коррозии на разных стадиях фреттинга изменяется характер коррозионных процессов: сначала преобладают процессы окисления - газовая коррозия, что вызвано высокой энергетической активносетью образующихся частиц материала и освобождающихся от окисных пленок поверхностей. Избыток кислорода способствует пассивации поверхности.

На втором этапе вследствие концентрации катодного деполяризатора кислорода преобладают электрохимические процессы.

При давлении р> 10Па скорость окисления не изменяется и вместо чёрного цвета окислаFe₃O₄ образуется окисел α – Fe₂O₂ – красного цвета. Окислы препятствуют износу, уменьшают коэффициент адсорбционного трения. Скорость химосорбции молекул газа является сдерживающей при давлении ниже критического. Закон окисления при этом имеет линейный характер [5]

$$\mathbf{h}_{ok} = \mathbf{k}_{ok} \mathbf{P}^{\mathbf{n}_{ok}} \mathbf{t} \,, \tag{1.4}$$

где h_{ok} — толщина слоя окиси; t-время окисления; k_{ok} и n_{ok} постоянные.

Зависимость между коэффициентом трения и толщиной слоя окиси имеет вид

$$f = \alpha(v) - \frac{\beta(v)}{h_{ok}} \log h_{ok} , \qquad (1.5)$$

где

$$\alpha(\mathbf{v}) = \gamma(\mathbf{v}) + \frac{\beta(\mathbf{v})}{h_{ok}} (\log k_{ok} + \log t).$$
(1.6)

С ростом толщины окисла снижается коэффициент трения. Значение к_{ок}определяют из выражения

$$k_{ok} = k_0^{\frac{W_a}{RT}}$$
(1.7)

где k₀ — постоянная Аррениуса;

 W_a — энергия активации;

R — газовая постоянная;

Т — температура.

Электронномикроскопические и электроннографические исследования показывают, что тонкие поверхностные слои, прилегающие к зонам В условиях фреттинга фактического контакта, могут находиться В высокодисперсном состоянии, включающем как металл, так и его окислы.

Свойства воздействии при циклических нагрузок существенно отличаются от стационарных условий. При испытаниях на фреттинг в зоне зафиксировать контакта титановых сплавов не удавалось прироста электросопротивления, a при снятии циклических нагрузок электросопротивление возросло до нескольких килимов. На поверхности, обнаружены признаки поврежденной фреттингом, не механического повреждения абразивом, а воздействия вязкой жидкости, т. е. окислы титана в процессе фреттинга находились в аморфном состоянии. Следовательно, продукты фреттинга на поврежденных поверхностях являются скорее следствием процесса, а не действующим фактором в процессе фреттинга.

Электрохимическая коррозия возникает не только в контакте, где образуется макро гальваническая пара. Макро гальванические пары в однородных материалах могут явиться следствием их структурной неоднородности, различной ориентации кристаллов, структурных несовершенств и т. д.

Показано, что благородные металлы (серебро, олово) в контакте со сталью 45 подвергаются фреттинг меньше, чем сама сталь. Материалы (цинк

Zn, кадмий Cd), имеющие по отношению к стали более отрицательный потенциал, интенсивно разрушались, защищая от разрушения сталь.

Фреттинг и фреттинг-усталость возникают в зонах контакта деталей, образующих прессовые или малоподвижные соединения, при циклическом их нагружении. Наибольшие повреждения фреттингом и разрушения от фреттингусталости наблюдаются на стальных деталях и деталях из титановых сплавов.

Условия возникновения процесса фреттинга в узлах авиадвигателей. Взаимодействие контактирующих поверхностей

При обычных условиях трения вследствие специфики напряженного состояния и определяющего действия тангенциальных сил в поверхностных слоях металлов происходит изменение, приводящее к образованию защитных окисных пленок (вторичных структур). Явление окисления отдалившихся частиц локализирует процессы разрушения, уменьшает силы трения и приводит к своеобразному состоянию антифрикционности, повышая износостойкость металлов [2].

Поверхностные неровности деталей можно представить в виде сегментов асимметричных или шаровых. В общем случае плотность реального контакта мала и его можно рассматривать как дискретный, пренебрегая взаимным влиянием одного выступа на другой. В некоторых случаях принимается модель контакта цилиндра с полуплоскостью.

Расчет напряженного состояния в зоне контакта основывается на ряде допущений, главными из которых являются:

а) изохронность и однородность материалов;

б) площади реального контактов существенно меньше номинальной площади контактирующих тел;

в) усилия, сжимающие тела, нормальны к гладким поверхностям касания;

г) деформации не превышают предела упругости.

Исходя из этого, рассмотрим распределение деформаций и напряжений в зоне контакта при сжатии шара с плоскостью [24].





Рис. 1.4. (a) Распределение напряжений σ на поверхности в направлениях x,y и p₀вдоль оси z, при сжатии шара с плоскостью.

 (б) Распределение касательных напряжений т,є,
 р₀и в направлениях х,у вдоль радиуса круговой площадки контакта

В крайнем поверхностном слое нормальные напряжения σ_z , совпадающие с внешним давлением на поверхности площадки, распределены вдоль диаметра площадки по полукругу с $\sigma_{z max} = -p_0$ в центре площадки и $\sigma_z = 0$ при z = a, т.е. на границе контакта (рис. 1.4.а). Напряжения σ_y , направленные перпендикулярно каждому радиусу, проведенному из центра контактной площадки, также не меняют своего отрицательного знака. При этом они, имея в центре значение $\sigma_{y max} = -0.8p_0$, уменьшаются на границе контакта до $-0.133p_0$ и распространяются за пределы площадки, асимптотически приближаясь к нулю.

Напряжения σ_x , характеризующие растяжение или сжатие каждого радиального волокна, лежащего в крайнем поверхностном слое, в центре площадки достигают значения $\sigma_{x \max} = -0.8p_0$, затем, резко уменьшаясь, переходят через нуль при $z \approx 0.94a$ и, меняя знак, достигают на границе площадки величины $\sigma_x = +0.133p_0$, сохраняя положительный знак, остаются равными по величине σ_v .

Следует заметить, что на границе площадки и за ее пределами в крайнем поверхностном слое величина $\sigma_x = -\sigma_y$ при $\sigma_z = 0$, что характеризует состояние чистого сдвига. Удаляясь вглубь материала от поверхности контакта, можно заметить, что от величины $\sigma_x = \sigma_y = 0.8 p_0$ напряжения снижаются и на глубине 2a они становятся пренебрежимо малыми. Напряжения σ_z сначала медленно уменьшаются, однако при z > 2a они начинают падать быстрее и становятся, мало ощутимыми на глубине z > 3a.

Касательные напряжения τ_{zx} вычисленные как полуразность σ_x и σ_z приобретают максимальное значение не на поверхности, где они равны $\tau_z = \frac{1}{2}(p - 0.8p_0) = 0.1p_0$, а при z =0.47а, где $\tau_{max} = 0.31p_0$, и которые далее по глубине резко уменьшаются по величине.

Анализ распределения касательных напряжений и относительных деформаций вдоль радиусов, проведенных из центра круговой площадки в крайнем поверхностном слое, показывает, что τ_{xz} и τ_{yz} равны в центре $0,1p_0$ уменьшаются к периферии площадки и меняют знак. На границе контакта они равны по абсолютной величине $0,066p_0$, но противоположны по знаку (рис. 1.4.б).

Напряжения τ_{xy} в центре площадки равно нулю, но увеличиваются вдоль, радиуса, достигая на границе величины $\tau_{xy max} = 0,133 p_0$. За пределами площадки τ_{xy} постепенно падают, становясь незначительными, при $z \ge 2a$. Деформации материала находятся в соответствие с изменением напряжений. Поэтому можно утверждать, что внутри круга с радиусом z = 0,94a все
элементы радиальных волокон в крайнем поверхностном слое сжимаются, перемещаясь к центру площадки, который наиболее сжат.

За пределами указанного круга материал в крайнем слое растягивается в радиальном направлении и сжимается в поперечном. Наибольшему удлинению вдоль радиуса (сжатию в тангенциальном направлении) подвергаются элементы на границе контактной площадки.

Качественно аналогичная картина распределения напряжений в зоне контакта сохраняется и для эллиптической формы контакта, но отличаются друг от друга σ_x и σ_y , что приводит к изменению относительной величины напряжений у границы контактной площадки и под поверхностью. С увеличением вытянутости эллипса уменьшаются касательные и растягивающие контурные напряжения на поверхности. Глубинные максимальные касательные напряжения при этом изменяются незначительно.

Однако наиболее интересны в данном случае являются результаты исследований совместного действия нормального и касательного усилия при контактном сжатии. Из работы [29] следует, что при наличии касательной нагрузки зарождается зона всестороннего растяжения, которая возрастает с увеличением касательной нагрузки. Одновременно с этим уменьшается зона всестороннего сжатия. Приложение внешних касательных усилий на контакте увеличивает глубинные касательные напряжения, приближая участок действия этих напряжений к поверхности контакта. В предельном случае сочетания внешних нормальных и касательных сил максимальные касательные выходят обуславливают на поверхность контакта И поверхностный критерий разрушения. В то же время касательные силы нарушают симметрию напряженного состояния, в результате чего возрастают растягивающие напряжения на поверхность определенной части контура пятна контакта.

При увеличении коэффициента трения до f = 0,3 максимальные касательные напряжения, вычисляемые как разница максимальных главных нормальных напряжений, располагаются не на глубине, а на поверхности.

Повышение коэффициента трения до f = 0,5 вызывает изменение знака перед скользящим контактом и может привести к местному выпучиванию поверхности.

Из анализа напряженного состояния материала в зоне контакта следует, что при контактных нагрузках имеют место большие напряжения, локализация их в небольших объемах материала вблизи поверхности.

При действии знакопеременных и при циклических нагружениях в зоне контакта имеют место процессы контактной усталости материала. Последние существенно отличаются от усталостных процессов, протекающих вне этих зон. Действительно, если в крайнем поверхностном слое, особенно в вершинах микро выступов наблюдается значительное пластическое деформирование материала, то на глубине, всего в несколько раз превышающих размеры контактной площадки, напряжения едва достигают десятых или даже сотых долей от величины предела упругости материала.

Выше показано, что в контакте имеется две опасные зоны: крайний поверхностный слой и зоны максимальных касательных напряжений на критической глубине, меньшей, чем размеры контактной площадки. При наличии сил трения (тангенциальной составляющей) на площадке контакта эти зоны могут слиться в одну.

Кроме того, на поверхности тела, передающего нагрузку, появляются дополнительные растягивающие напряжения и деформации позади контакта (считая по направлению действия тангенциальной силы) и сжимающие впереди контакта. У тела, воспринимающего нагрузку, напряжения изменяются в обратном порядке по отношению к направлению действия внешней нагрузки. Во всех случаях периодическое раскрытие стыка между контактирующими поверхностями создает условия для возникновения относительных периодических перемещений (деформаций) поверхностей, т.е. условия для развития фреттинг.

1.6. Особенности образования дефектов и разрушений в конструкциях, связанные с процессом фреттинга

Процесс фреттинга возникает и протекает в зоне сопряжения деталей, где в рабочих условиях возможны их относительные циклические возвратные микро перемещения. Внешним признаком этого процесса является образование и выделение из зоны контакта, как правило, окисленных продуктов повреждения материалов сопряженных пар.

Такими участками в конструкциях являются прессовые или малоподвижные соединения типа: вал - подшипник, шлицевые, болтовые, заклепочные соединения, контакты в бандажных полках, замках лапоток и т.п.

В газотурбинных двигателях ГТД к таким соединениям, кроме указанных относятся: замковые соединения типа «ласточкин хвост», ёлочные, шарнирные, фланцевые, болтлвые соединения и т.д.

Последствия процесса фреттинг-коррозии трения могут быть самыми различными, но всегда достаточно тяжелыми. Например, повреждение фреттингом процессом контактных клемм в электрических цепях может привести к самопроизвольному отключению электрической цепи. Следствиями процесса в зоне прессовой посадки могут явиться ослабление натяга, появление зазора, и, наконец, усталостные разрушения и т.д.

Причиной повреждения ступичной части диска вентилятора ГТД может явиться взаимное смещение пакета деталей, ослабления затяжки болтового соединения, развитие усталостных трещин в полотне или ободной части диска и др. Следует отметить, что очагом разрушения и в этом случае оказался не концентратор напряжений в виде отверстия на фланце, а поврежденный фреттинг- коррозий участок вблизи или внутри его. Трещины образуются в местах, не связанных с конструктивными концентраторами напряжений в виде отверстий, впадин зубьев, галтелей и т.д., теоретические коэффициенты концентраций для которых достигают или превышают $\alpha_{\sigma} \ge 2$.

Используя рассуждения, сделанные выше, можно оценить величину эффективного коэффициента концентрации для этого примера и всегда значение $K_{\sigma}^{\phi p}$ будет больше, чем α_{σ} для геометрического концентратора напряжений (фаски, отверстия, галтели и т.д.).

Часто в практике эксплуатации ГТД имеют место разрушения замковых соединений лопаток компрессора. Как и в рассмотренных выше случаях, здесь очагами усталостных разрушений являются повреждения от фреттинг-коррозии.

Факторами, способствующими этим разрушениям являются наличие значительных по величине переменных напряжений, возникающих при колебаниях профильной части лопатки, по первой изгибной или крутильный форме. Местное повышение давления на контактной грани хвостовиков вследствие плохого прилегания площадок контакта.

Для данной конструкции сделать оценку α_{σ} и К_{σ} несколько сложнее, т.к. сведения о коэффициентах концентрации напряжений здесь весьма ограничены. Исследования [13] показывают, что на контактной площадке хвостовиков максимальные напряжения находятся примерно в центре площадки и значение коэффициента концентрации составляет при этом около $\alpha_{\sigma} \approx 2$. В то же время значение коэффициента концентрации α_{σ} в радиусе перехода от профильной части к замку может составлять $\alpha_{\sigma} \approx 1,9 \dots 3,2$ и более в зависимости от величины радиуса перехода.

Следует учесть, что в качестве конструкционных материалов для лопаток компрессоров применяются материалы, чувствительность которых к концентрации напряжений высока, значения q_{σ} , приближаются к единице. Поэтому К_{σ} здесь будет ÷ 3.

Примеры типичных разрушений замковых соединений типа ласточник хвост показаны на рис. 1.5, Нужно подчеркнуть, что подобный дефект может иметь место и на рабочих лопатках с бандажными полками.



(б)



(г)



(B)

Рис. 1.5. Примеры типичных разрушений замковых соединений типа «ласточкин хвост» лопаток компрессора:

а) сталь 13Х11Н2В2МФ, угол наклона контактной грани, хвостовика α =70⁰; б) сталь 14Х17Н2, α =70⁰; в) сплав ВТ9. α =36⁰, г) сплав ВТ8. α =45⁰.



Рис. 1.6. Разрушение от фреттинг-усталости проушин шарнирных хвостовиков лопаток компрессора. Стрелками показаны зоны повреждения проушин Фрутингом и очаги разрушений

На рис. 1.6. показаны примеры разрушений шарнирных соединений вследствие повреждения проушин Фрутингом и очаги фреттинг-усталости. Очаги разрушения и на этот раз не совпадают с опасным сечением проушины.

Аналогичные последствия для замковых соединений имеют место при связных колебаниях лопаток и диска, однако при этом наблюдаются разрушения не только проушин, но и ободной части диска.

На рис.1 показано разрушение от фреттинг-усталости вала редуктора, повреждённого Фрутингом в зоне соединения с венцом шестерни.

Известны случаи, когда разрушения подобного типа имели место на ответной детали - выступе диска.

Одним из способов устранения резонансных колебаний рабочих лопаток ГТД по первой изгибной форме является применение шарнирного замкового соединения. Однако при колебаниях по высшим, в частности, крутильным формам, функции шарнирного соединения нарушаются, и соединение переходит в класс малоподвижных со всеми вытекающими из этого последствиями.









Рис.1.7. Разрушение вала-шестерни по фланцу в зоне болтовых соединений с шестерней от фреттинг-усталости (стрелками указаны очаги усталостных разрушений): а) участки повреждений фреттинг-коррозией и усталостные трещины на фланце вала; б) очаги зарождения усталостных трещин в зоне контакта болтовых соединений; в) вид призонных болтов, повреждённых Фрутингом, разрушенных от усталости

Причиной возникновения процесса фреттинга и разрушения шарнирного

соединения может явиться недостаточная жесткость пальца, приводящая при действии центробежных сил к его вокализации, а при повторных запусках и изменениях режима работы ГТД к дополнительным деформациям и перемещениям пальца относительно проушины лопатки. Пользуясь данными [5] для конструкций шарнирных замковых соединений можно принять, что значения К_о превышают 3.5.

Известны случаи, когда выход из строя вследствие этого процесса других деталей приводил к разрушению основных элементов конструкции. Например, повреждение заклепочного соединения, фиксирующего положение направляющей лопатки компрессора, сопровождалось не только разрушением последней, но и находящимися по соседству с ней рабочими лопатками.

Можно привести ещё много примеров, иллюстрирующих разрушения, вызываемых в конструкциях процессом фреттинга, однако, и из приведенных примеров ясно, сколь широко распространено это явление в ответственных узлах, как значительно снижается прочность и надёжность изделия и как важно знать условия возникновения процесса фреттинг-коррозии.

1.7. Цели и задачи исследования

В итоге можно заключить, что ни одна из рассмотренных гипотез о механизме процесса, как показывает анализ, не является универсальной и, в лучшем случае, лишь указывает на существование двух факторов процесса: химического и механического.

Ни в одном случае не учитываются условия напряженного состояния материала в зоне контакта и, как правило, не учитываются физико-химические свойства тел, образующих контактирующие поверхности.

Существенным недостаткам рассмотренных предложений о механизме влияния процесса фреттинг-коррозии на усталость является отсутствие связи между процессом фреттинг-коррозии и степенью снижения несущей способности материала в этих условиях.

Остается неясным, на всех ли стадиях процесса имеет место снижение сопротивления усталости материала и т.д.

Причины снижения сопротивления усталости в условиях фреттинга, в меньшей мере можно связать с образованием на поврежденных участках каверн, скоплением в зоне контакта, согбенно в кавернах, продуктов износа и значительным повышением там давления, и образованием микротрещин усталости на границах участков локального контакта.

Целью работы является: выделить и установить роль основных факторов процессов фреттинга и фреттинг-усталости по формированию сопротивления усталости малоподвижных соединений в деталях ГТД:

 исследовать напряженно - деформирование состояние (НДС) замковых соединений лопаток компрессоров;

 — разработать конструктивно-технологические методы, позволяющие повысить сопротивление фреттинг- усталости замковых соединений;

- разработка физической модели разрушения деталей, повреждаемых фреттингом, а так же создание комплексной методики повышения эксплуатационной надёжности замковых соединений лопаток компрессоров двигателей, авиационных выполненных ИЗ различных материалов, повреждаемых фреттингом в эксплуатации.

1.8. Научно – технические задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие научно - технические задачи:

 провести анализ дефектов лопаток компрессоров, имеющих замковые соединения типа "ласточкин хвост" и определить превалирующие эксплуатационные факторы, вызывающие процесс фреттинга и разрушения от фреттинг-усталости; — предложить комплексную методику исследования процесса фреттинга и НДС хвостовиков лопаток компрессоров ГТД и провести экспериментальные исследования влияния эксплуатационных факторов на сопротивление усталости хвостовиков лопаток с учётом фреттинг- коррозионного или усталостного;

 провести анализ механизма процесса фреттинга и типы повреждений, приводящих к усталостным разрушениям замковых соединений лопаток компрессора;

- разработать модель разрушения деталей при фреттинге;

 на основании оценки несущей способности соединений «ласточкин хвост» оптимизировать конструктивно – технологические решения замковых соединений лопаток.

Глава 2.

Обобщение экспериментальных данных исследований повреждаемости и усталостной прочности компрессорных лопаток и материалов авиационных двигателей

2.1.Оценка несущей способности замковых соединений лопаток и рекомендации по их оптимальному конструированию

На рис. 2.1 приведены кривые 1 соответствуют результатам испытаний на МнЦУ стандартных образцов, предварительно поврежденных фреттингом при N^{фр} и заданных параметрах (р и A_p) процесса. Следующая партия образцов (кривые 2) из тех же материалов была испытана на фреттинг-усталость по схеме вал - втулка в условиях «мягкого нагружения» при плоском изгибе. Кривые 3 - испытания моделей замковых соединений лопаток компрессора при «жестком нагружени», т. е. при совместном действии статического растяжения И симметричного изгиба. когда в зоне контакта воспроизводятся эксплуатационные условия фреттинга, а соединение разрушается от фреттингусталости.

Из анализа приведенных на рис. 2.1 графиков можно заключить, что в одних и тех же условиях нагружения у образцов и деталей из стали (рис. 2.1, а) и из титановых сплавов (рис. 2.1, б) наблюдается различная повреждаемость фреттингом.

Удовлетворительное соответствие степени повреждения материала (качественное и количественное) при испытаниях на усталость образцов, предварительно поврежденных фреттингом, и моделей, испытанных в условиях фреттинга, получено для стали 13Х11Н2ВМФ.

Аналогичное совпадение результатов получено также для титанового сплава ВТ8 при испытаниях по схеме "вал — втулка" и моделей замковых соединений (рис. 2.1, б), а при раздельных (ступенчатых) испытаниях

стандартных образцов выявлена только качественная зависимость изменения предела фреттинг-выносливости. Основная причина некоторого расхождения результатов связана с упрощенной схемой испытаний стандартных образцов по сравнению с моделями, когда условия процесса фреттинга действуют постоянно, но с отсутствует статическое растяжение.



Рис. 2.1. Результаты испытаний на МнЦУ и фреттинг-усталость различных сопряженных материалов:

а - сталь 13Х11H2BMФ- сталь 13Х11H2BMФ; б- сплав ВТ8 - сплав ВТ3-1; 1 - образцы, предварительно поврежденные в процессе фреттинга; 2 - испытания по схеме вал- втулка ("мягкое" нагружение); 3 - испытания замковых соединений лопаток компрессоров ("жесткое" нагружение).

2.1.1.Методика исследования процесса фреттинга и влияние его на сопротивление усталости деталей

Традиционные методы изучения механизма износа, когда степень повреждения обычно оценивается по изменениям массы образцов, профиля поверхности контакта, малопригодны для исследования фреттинга, а тем более для прогнозирования влияния степени повреждений при фреттинг-коррозии на сопротивление фреттинг-усталости конструкционных материалов и деталей.

Известные модели процесса фреттинга, рассмотренные выше, в основном базируются на традиционной зависимости, когда интенсивность процесса износа, характеризуемая степенью потери массы контактирующих тел, принимается как функция параметров процесса (величины контактных нагрузок, амплитуды перемещений, частоты и др.). Однако процесс фреттинга от процесса износа при трении скольжении отличают наличие относительных возвратных перемещений деталей в зоне контакта, а их амплитуда А_р на несколько порядков меньше, чем при трении скольжении.

Физико-химические, усталостные и абразивные механизмы процесса фреттинг-коррозии тесно связаны между собой. И от того, какой из них преобладает, а также от параметров процесса (амплитуды A_p, давления p) зависит предел выносливости при фреттинг-усталости $\sigma_{-1}^{\phi p}$ материала сопряженных пар. Однако получение зависимостей вида $\sigma_{-1}^{\phi p} = f(A_p)$ или $\sigma_{-1}^{\phi p} = f(p)$, которые можно использовать для прогнозирования $\sigma_{-1}^{\phi p}$ с высокой достоверностью, связано с большой трудоемкостью испытаний. Приведенные ниже результаты методической работы по определению оптимальной длительности повреждения материала в условиях фреттинг-коррозии (N^{фp}) дают достаточно объективную картину влияния основных параметров процесса на степень повреждения и на предел выносливости контактирующих материалов. В качестве тестового материала был выбран деформированный алюминиевый сплав АК4-1, обладающий высокой чувствительностью к концентрации напряжений. Его предел выносливости в исходном состоянии на базе N = 10^6 циклов составляет σ₋₁ = 160 МПа. Стандартные образцы из этого сплава, поврежденные фреттингом при амплитуде A_p = 5 мкм и давлении p = 5 и 50 МПа, испытывали на многоцикловую усталость (МнЦУ) при симметричном изгибе с вращением (на каждом режиме было испытано не менее 10 образцов).

Согласно полученным данным фактор длительности по числу циклов нагружения N^{фp} повреждения фреттингом в зависимости от величины нормального давления р и амплитуд напряжений при испытаниях на МнЦУ поразному влияют на долговечность деталей (таблица 2.1).

Таблица 2.1

Результаты испытаний образцов из сплава АК4-1 на фреттинг-коррозию при постоянном значении амплитуды относительных перемещений (A_p = 5 мкм) и последующих испытаний на многоцикловую усталость (МнЦУ) при симметричном изгибе с вращением

Вариант	Испи	ытания	Последующие испытания на МнЦУ	
испытаний	на фр	реттинг		
	р, МПа	№ ^{фр} х10 ⁶ ц	р, МПа	N _p , х 10 ⁶ ц
1	5	0,135	160	3,0 разруш.
2			130	40 разруш.
3		1,53	160	7,9 разруш.
4			130	12,4 разруш.
5			105	Более 300, безразруш
6		5,85	160	7,0 разруш.
7			130	Более 100, без разруш.
8			105	Более 70, без разруш.
9	50	0,135	160	2,0 разруш.
10		1,53		1.1 разруш.
11		0,24	105	Более 100, без
				разруш.
12		2,7		1,12 разруш.

Хотя степень повреждения материала при фреттинг-коррозии зависит от числа циклов нагружения $N^{\phi p}$, ее влияние на долговечность разрушения N_p не монотонное: наблюдается чередование максимумов и минимумов. Так, долговечность образцов, поврежденных фреттингом при давлении p = 5 МПа и $N^{\phi p} = 1,53 \cdot 10^6$ циклов и испытанных на МнЦУ при амплитудах $\sigma = 160$ и 130

МПа, составила $N_p = 3 \cdot 10^6$ и 40 · 10⁶циклов соответственно (варианты 1 и 2 в таблице 2.1). Затем с увеличением $N^{\phi p}$ на порядок долговечность N_p снизилась (варианты 3 и 4), а при амплитуде $\sigma = 105$ МПа долговечность N_p резко возросла, превысив 300 · 10⁶циклов (вариант 5).

Последующее почти четырехкратное увеличение $N^{\phi p}$ существенно (по сравнению с вариантами 3 -4) на долговечности N_p не отразилось. Воздействие фреттинг-коррозии при давлении p = 50 МПа снизило долговечность образцов по сравнению с давлением p =5МПа, хотя при $N^{\phi p} = 0,24 \cdot 10^6$ циклов и $\sigma =105$ МПа образцы без разрушения выдержали $N_p > 10^8$ циклов. На основании полученных данных за базовую продолжительность предварительного повреждения образцов при исследованиях механизма фреттинга можно принять долговечность $N^{\phi p} = 0,2 \cdot 10^6$ циклов, как достаточную для формирования типичных для фреттинга повреждений, оказывающих влияние на снижение сопротивления МнЦУ материала.

2.1.2. Выбор и обоснование метода исследования

Изучение механизма процесса, основных его закономерностей, связанных, в первую очередь, с формированием несущей способности деталей, работающих в условиях фреттинга, необходимо для разработки эффективных методов борьбы с этим процессом в деталях машин. Отсюда вытекают этапы исследования:

1) изучение основных факторов, способствующих интенсификации процесса фреттинга и их влияния на фреттинг-усталость материала;

2) изучение сопротивления усталости конструкционных материалов в условиях фреттинга;

3) исследование способности элемента конструкции выдерживать действие переменных нагрузок в условиях фреттинга. На первом этапе в условиях фреттинга при заданных параметрах основных факторов, способствующих интенсификации процесса фреттинга, и заданной длительности N^{фp} повреждения проводились раздельные испытания стандартных усталостных образцов, применяемых для испытаний на МнЦУ.

В зависимости от перечисленных факторов определяли параметры, традиционные при исследовании процесса фреттинга: характер и глубину повреждения поверхности; фиксировали изменения в структуре материала в зоне контакта, массу образцов; вели регистрацию изменений электросопротивления в зоне фреттинга.

Ha втором этапе находили величину предела выносливости конструкционного материала, повреждённого при заданных параметрах процесса фреттинга А_ри Р. При этом определяли значения пределов выносливости $\sigma_{-1}^{\phi p}$ как функции от амплитуды относительных перемещений A_p (при постоянном давлении p = const) или функции от номинального давления p = var (при постоянной амплитуде относительных перемещений A_p = const). Кроме того, в зависимости от перечисленных факторов могут определяться традиционные для этих исследований характеристики, такие как степень повреждения поверхности фреттингом (вид и глубина повреждений, изменение массы, электросопротивления и др.). Проведение испытаний на усталость повреждённых фреттингом образцов позволяет получить данные о значении и влиянии исследованных факторов фреттинг-процесса (c известными параметрами) на сопротивление усталости и оценить степень их значимости более простыми (раздельными) испытаниями. Испытания на фреттингусталость проводились по схеме «вал-втулка» при двух видах нагружения: «мягком» и «жёстком». При этом была получена зависимость вида $\sigma_{-1}^{\varphi p} = f(p)$, а также оценена эффективность применения в зоне контакта конкретных упрочняющих обработок и защитных покрытий. На третьем этапе исследовали напряжённо-деформированное НДС состояние элемента конструкции

(замкового соединения типа «ласточкин хвост») на поверхности контакта соединения (хвостовика с диском) с учётом конструктивных факторов в условиях нагружения, приближённого к эксплуатационным (статическое растяжение с симметричным знакопеременным изгибом) и были проведены испытания с учетом опыта исследований [1, 5, 21, 25, 26, 27], а именно:

основных геометрических параметров хвостовика (угла клина α, высоты h и др.);

 – конструктивных особенностей сопряжения хвостовика с пазом в ободе диска;

- изменения напряжений смятия на контактной поверхности хвостовика;

 величины соотношений между изгибными жёсткостями хвостовика и профильной частью лопатки;

— материала детали;

температуры испытаний;

— эффективности технологических факторов (влияние поверхностного упрочнения зон контакта, нанесения защитных покрытий).

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 (раздельных) 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.

2.2. Оценка предела выносливости малоподвижного соединения типа «вал-втулка»

Чувствительность материала к фреттинг-усталости характеризуется коэффициентом К^{фр}_σ, который вычисляется как отношение

$$K_{\sigma}^{\phi p} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1}^{\phi p}} \tag{2.1}$$

В общем случае значение $K_{\sigma}^{\phi p}$ может быть получено экспериментально. В предыдущих главах показано, что для оценки предела фреттинг выносливости деталей, повреждаемых фреттинг-коррозией, могут быть использованы значения, определённые достаточно простыми средствами при испытаниях материала на усталость по схеме «вал-втулка». Для этой цели могут быть использованы различные виды испытаний на усталость стандартных образцов с втулками на рабочей части или с накладками, имитирующими прессовое или малоподвижное соединение. При этом необходимо различать два вида нагружения такого типа соединений: «жёсткое» и «мягкое». В первом случае: циклическая нагрузка на вал полностью воспринимается втулкой (накладкой). При «мягком» нагружении основная нагрузка воспринимается валом.

В частности, в условиях «жёсткого» нагружения находится замковое соединение лопаток ГТД и газотурбинных установок ГТУ, где роль втулки выполняют поверхности контакта пазов выступов диска.

Результаты испытаний на усталость показывают, что величина $K_{\sigma}^{\phi p}$ при «жёстком» нагружении и в зависимости от материалов контактирующих пар оказывается в 1,2 ... 2,0 раза больше, чем при «мягком» нагружении.

В зависимости от того, однородные или разнородные материалы образуют контактирующие пары, а также от механических свойств материала и уровня давления р на площадке контакта величина коэффициента $K_{\sigma}^{\phi p}$ может значительно изменяться в сторону больших или меньших значений.

Важным является то обстоятельство, что статистические характеристики рассеяния результатов испытаний материала на фреттинг-усталость остаются такими же, как и при обычных испытаниях на Мну.

При повышенных температурах интенсивность процесса фреттинга по сравнению с нормальной температурой практически не изменяется, если при этом не образуются дополнительные виды окислов, различающихся по

твёрдости и адгезионным свойствам. Поэтому значения К^{фр}_σ можно определять при нормальной температуре.

Анализ результатов испытаний на фреттинг-усталость позволяет сделать заключение о том, что в диапазоне долговечностей $10^6 \dots 10^8$ циклов, представляющем наибольший практический интерес, кривые фреттингусталости в координатах lg σ - lgN могут быть аппроксимированы прямыми вида $\sigma^m N = \text{const.}$ При этом для титановых сплавов значения показателя кривой усталости m составляют ~12, для сталей типа 13X12H2BM Φ – m ~ 16, а для деформируемых алюминиевых сплавов типа AK4-1; m = 11 ... 15.

Такие значения m соответствуют диапазону амплитуд напряжений $\sigma_a = (1 \dots 1,3) \sigma_{-1}^{\phi p}$, где $\sigma_{-1}^{\phi p}$ - среднее значение предела выносливости материала при фреттинг-усталости на базе N = 5 · 10⁷ … 10⁸ циклов.

При долговечностях N < 10^6 циклов значения показателя m резко уменьшаются, а при амплитудах напряжений, составляющих $\sigma \phi_a^{p} \ge (1.5 \dots 2.2)$ $\sigma_{-1}^{\phi p}$, может наблюдаться даже изменение знака у коэффициента m.

Величина предельной амплитуды ($\sigma_a^{\phi p}$)_д для детали, повреждаемой фреттингом, может быть определена из выражения:

$$(\sigma_a^{\varphi p})_{\mathrm{A}} = (\sigma_{-1}^* - \psi_{\sigma} \sigma_{c\mathrm{K}}) 1 / (K_{\sigma}^{\varphi p})_{\mathrm{SKB}}$$

где, ψ_{σ} - коэффициент ударной вязкости материала

 $\sigma_{c \varkappa}$ - придел прочности при сжатии

 σ_{-1}^* - придел выносливости.

2.3. Влияние эксплуатационных факторов на сопротивление усталости замковых соединений при действии фреттинга

В эксплуатации кроме силовых факторов, определяемых конфигурацией детали и действием внешних сил (статических, циклических и вибрационных), на деталь действует ряд других факторов, связанных с особенностями влияния

окружающей среды: коррозия, изменение температуры, эрозия, износ, фреттинг и т. д. Силовые факторы, за исключением вибрационных и, в какой-то мере, циклических, достаточно точно прогнозируются и учитываются на стадии проектирования.

Проблема защиты деталей от коррозии решается, в первую очередь, за счет правильного выбора коррозионностойких материалов. Этому способствует широкое применение титановых и никелевых сплавов и, отчасти, коррозионностойких сталей. Из опыта эксплуатации ГТД следует, что практически всегда возникают условия, когда детали могут подвергаться различными видами коррозии (точечной, межкристаллитной, солевой, газовой и т. д.). Этому кроме напряженности детали способствуют:

внешняя среда, включая температуру;

- технологическая наследственность;

- повреждения эрозией, забоины и т. д.

Если первый и третий факторы практически нерегулируемы, то второй, связанный с технологией изготовления детали, управляем, а влияние его на коррозионную стойкость в ряде случаев является решающим. Эффективность применения защитных антикоррозионных покрытий определяется, в первую очередь, их живучестью в эрозионных условиях и стойкостью к терм циклам.

Фреттинг относится к эксплуатационным повреждениям, приводящим к значительному снижению сопротивления усталости деталей. Поэтому необходимо предусмотреть его появление на этапе проектирования в малоподвижных соединениях ГТД (лопатках, дисках, валах и корпусах).

2.4. Влияние на фреттинг-усталость амплитуды Ар и давления р

Для основных конструкционных материалов, применяемых в компрессорах ГТД, получены зависимости относительного предела выносливости ($\sigma_{-1}^{\phi p}$)_{отн} от A_p и p (рис. 2.2). Наибольшее снижение предела

выносливости отмечено при таких сочетаниях A_p и p, когда в зоне контакта преобладает процесс схватывания ($A_p = 5 \dots$ мкм). Наименьшее — при абразивном износе ($A_p > 201$ мкм).

Максимальное снижение свойств материала, поврежденного фреттингом, соответствует узкому диапазону значения.



Рис. 2.2. Зависимость ($\sigma_{-1}^{\phi p}$)_{отн} для различных материалов, поврежденных фреттингом: от давления (а) и амплитуды (б):

- а) 1 сталь 13Х11Н2В2МФ (Т_{отп} =560°С), p=125 МПа; 2 сплав ВТЗ-1,p = 50 МПа;
- 3- сплав ВТ8, p = 125 МПа; 4 сталь 13Х1Ш2В2МФ (Т_{отп} =680°С),p = 50 МПа;
- б) 1 13Х11Н2В2МФ (Т_{отп}=560°С), А_р= 14 мкм; 2)сталь13Х1Ш2В2МФ (Т_{отп}=680°С), А_р= 16мкм; 3 сплав ВТЗ-1, А_р= 14 мкм; 4 сплав ВТЗ А_р =11 мкм

Аналогичные результаты были получены Функом и Уотерхаузом на сталях Ck 35, AISI 9310 и 4130.[5]

Интенсивность процесса фреттинга существенно зависит от коэффициента проскальзывания f_{тр} в зоне контакта, который, определяется из выражения

$$f_{\rm Tp} = 1 - \frac{A_{\rm p}}{A_0},\tag{2.2}$$

где A_p — амплитуда перемещений при p> 0; A₀ — амплитуда при p= 0. Функция степени снижения предела выносливости от f_{тр} может быть представлена в виде

$$(\sigma_{-1}^{\Phi p})_{\text{om}\mu}^{n} + \text{frp}^{n} = 1,$$
 (2.3)

При этом fтp = ηB , B = (Lgp)^k, где *n*, η , k — постоянные, определяемые экспериментально. Тогда

$$(\sigma_{-1}^{\phi p})_{\text{OMH}}^{n} = [1 - (\eta B)^{n}]^{1/n}.$$
(2.4)

сопротивление усталости при A_p ÷ 20 мкм не зависит от частоты нагружения, при A_p ÷ 100 мкм влияние фреттинга на усталость с увеличением частоты нагружения ослабевает, так как с увеличением скорости относительных перемещений резко возрастает абразивный износ.

2.5. Влияние на сопротивление фреттинг-усталости числа циклов нагружения

Степень снижения предела выносливости (или долговечности N_p) зависит от продолжительности процесса фреттинга $N_{\phi p}$, но не является его монотонной функцией (табл. 2.1): для процесса характерно чередование максимумов и минимумов степени повреждения материала. Но общие закономерности процесса повреждения в полной мере проявляются при числе циклов нагружения $N_{dp} \approx 10^5$.



Рис. 2.3. Зависимость $(\sigma_{\alpha}^{\phi p})_{\text{отн}}$ от давления в контакте: кривые 1-3 — пара: сталь—сталь (13Х1Ш2В2МФ), отпуск 580°С; кривые 4-6 пара: сплав BT8-BT8;

1 и 4 -образцы, предварительно поврежденные фреттингом; 2 и 5, 3 и 6 -соответственно образцы и детали, испытанные на фреттинг-усталость

Исследования на фреттинг-усталость обычно проводятся на соединении типа «вал-втулка», воспринимающем циклические нагрузки от плоского или кругового изгиба, растяжения — сжатия или кручения в зависимости от поставленной цели.

Эти испытания позволяют в той или иной мере воспроизвести условия нагружения прессовых или малоподвижных соединений. В некоторых схемах нагружения получают зависимости $\sigma_{-1}^{\phi p} = f(p)$, а иногда и $\sigma_{-1}^{\phi p} = f(A_p)$. Эти испытания полезны при выборе технологических или конструктивных способов подавления процесса фреттинга и для оценки несущей способности соединения типа «вал—втулка».

Результаты испытаний образцов и деталей на фреттинг-усталость практически не отличаются, если ввести поправки, учитывающие особенность напряженного состояния деталей (рис. 2.3). Разный характер кривых 1...3 и 4...6 свидетельствует о различиях в механизме повреждения поверхности титанового сплава при фреттинге и фреттинг-усталости.

2.6. Влияние на сопротивление усталости природы материалов

Зависимость сопротивления усталости при фреттинге от природы контактирующих материалов, их механических свойств достаточно сложна, так как при фреттинге имеют место адгезионные, усталостные, химические и электрохимические процессы.

Из данных Таблица. 2.1 следует, что с уменьшением твердости материала накладок $K_{\sigma}^{\phi p}$ для титанового сплава может снижаться. Однако для некоторых вариантов эта закономерность несправедлива. Аналогичное явление наблюдается для сплава Д1Б: для ряда вариантов с уменьшением твердости накладок уменьшается $K_{\sigma}^{\phi p}$, для других вариантов возрастает.

Сложность оценки влияния на сопротивление усталости свойств материала

сопряженных пар заключается в том, что на интенсивность повреждения фреттингом сильное влияние оказывают окислы, которые могут иметь более высокую твердость, чем основной материал. Например, твердость окиси меди примерно вдвое, никеля — втрое, окиси магния, титана или железа — в 10 раз выше твердости основного материала, а окись алюминия по твердости превосходит закаленную или азотированную сталь. Поэтому при контакте стальной детали с алюминиевой разрушение в зоне сопряжения идет по стальной детали.

2.6.1. Методы определения амплитуды относительных перемещений и величины нормального давления

Автор действительной использовал измерения амплитуды ДЛЯ перемещений индукционный датчик. Изрис. 3.9 следует, что в ростом величины нормального давления амплитуда перемещений может в несколько раз отличаться от величины, задаваемой по эксцентрику, т.е. в зависимости от степень "подвижности" величины нормального давления изменяется соединения.

Конструкция установки для испытаний в условиях фреттинг- коррозии обеспечивает передачу перемещений образцу лишь через один захват, что позволяет использовать при исследованиях второй захват для измерения действительной величины амплитуды перемещений.

Для этой цели на свободный захват образца закреплялся специальный удлинительный рычаг, позволявший получать дополнительное увеличение амплитуды перемещений в x20, а при необходимости и более раз.[15]

В качестве измерительного устройства использовался оптический измеритель типа КМ-6, обеспечивающий при фокусном расстоянии 140÷150 мм.Диапазон исследованных значений амплитуд составлял 0,010÷0,035 мм. С учетом удлинительногорычага (x20) измеряемые перемещения составляли

0,20÷1,4 мм припредельной погрешности измерения КМ-6 не более 0,006 мм.

Это обстоятельство указывает на отличия, возникавшие в зоне контакта, для различных образцов, прилегание сухарей к рабочей части образца всякий раз контролировалось по краске, площадь прилегания не менее 90%.



Рис. 2.4. Зависимость амплитуды относительных перемещений от величины удельных давлений в зоне контакта:
1)- о-пара: сталь по стали; 2)- х-пара: титан по титану

Давление в зоне контакта задавалось с помощью винтового нагружающего устройства через динамометр. Величина усилия определялась по индикатору (микрометру) часового типа, установленном на предварительно про тарированном динамометре.

Нормальное давление в контакте вычислялось как отношение силы на сектор площади рабочей поверхности сухаря на диаметральную плоскость образца, т.е. определялось номинальное значение давления.

2.7. Влияние на сопротивление усталости окружающей среды и температуры

Существенного увеличения интенсивности процесса фреттинга при повышенных температурах не отмечается, а быстрое или избирательное окисление некоторых компонентов сплава способствует образованию защитной пленки окислов, уменьшению повреждения фреттингом и снижению степени

снижения предела выносливости.

Наиболее полные и достоверные сведения о сопротивлении усталости элементов конструкций с малоподвижными соединениями (валов с процессовыми посадками, болтовых и шлицевых соединений и т. п.) можно получить при исследовании натурных деталей в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Анализируя результаты испытаний по схеме «вал—втулка», можно отметить, что степень снижения предела выносливости исследуемого материала в значительной мере зависит от того, как передается нагрузка: втулкой и валом («жесткое» нагружение) или только валом («мягкое» нагружение). При «жестком» нагружении предел выносливости оказывается в 1,2 ... 2 раза ниже, чем при «мягком» нагружении.

В табл. 2.3, 2.4 приведены результаты испытаний на фреттинг-усталость (при «жестком» и «мягком» натружениях) конструкционных материалов, применяемых в ГТД. Из этих данных следует, что при «мягком» нагружении наиболее чувствителен к фреттингу сплав ВТ8.

Для сплава АК4-1 и стали 1311H2B2MФ в паре с однородными материалами и для сплава BT8 в паре со сталью наибольшее снижение предела выносливости наблюдается соответственно при давлениях 50 и 100 МПа, Для сплава BT8 в паре со сталью при этих давлениях максимальное значение $K_{\sigma}^{\phi p}$ = 3,45; с повышением давления до 200 МПа предел выносливости увеличивается примерно в два раза $K_{\sigma}^{\phi p}$ = 1,76.

При испытаниях по жесткой схеме нагружения значения $K_{\sigma}^{\phi p}$ возрастают, а минимальные значения $K_{\sigma}^{\phi p}$ при жестком нагружении соответствуют тем вариантам, где применялись интенсивные упрочняющие обработки: обкатка роликом, обдувка микрошариками. В этом случае поверхностный слой имел пластическую деформацию на глубину до 100 мкм, где сжимающие напряжения достигали 500 МПа.

Таблица 2.2

Основной	Вариант	Материал накладки	Твердость	Нормальное	K ^{φp} _σ
материал			накладок	Давление Р,	0
				МПа	
Титановый сплав	2	Mg	39	103	1,05
RC130B	3	Al (1100F)	41	103	1,05
σ _в =1110 МПа	4	A1 (7075-T8)	126	103	1,12
НВ= 3500МПа	5	Cu	194	103	2,35
σ _{−1} =616 МПа	6	Латунь (70/30)	96	103	1,24
	7	Ti(RC-130B)	117	103	2,98
	8	Fe-ll%Cr-2,8%Mo	354	103	2,49
	9	Сталь SAE4340	207	103	3,7
Алюминиевый	11	Напыление WC	397	152	4,24
сплав Д1Б	21	Сталь 12Х2Н4А	946	276	4,24
$σ_{\rm B} = 400 \rm M\Pi a$	Ι	Латунь ЛК80-3	232	90	2,11
_	II	Латунь Л-96	185	90	1,7
НВ = 129 МПа	III	сплав МА-2	176	90	2,5
σ _{−1} =150 МПа	IV	Металл фторопласт	228	90	1,5
-	V		-	90	1,56

Даяние о сопротивлении фреттинг-усталости сплавов RC130В и Д1Б в паре с различными материалами[14]

Таблица 2.3

Результаты испытаний па фреттинг-усталость конструкционных материалов при «мягком» нагружении. Симметричный плоский изгиб N = 2 ·10⁷ циклов, T_{ucn}= 20 °C [14]

Материал		Давление в контакте Р МПа	Предел выносливости	$K^{\varphi p}_{\sigma}$
образец	наклалка	Konfukto I, milu	0_{-1}^{-1} , with	
Сплав АК4-1			100	1.0
	АК4-1	5	72.5	1.37
	"	50	62	1.61
		100	78	1.28
Сталь	Сталь		550	1.0
13X11H2BMФ	13X11H2B2MФ	10	310	1,79
Отпуск 580 °С	(отпуск 580 °С)	100	260	2,12
5		200	280	1,96
Сплав ВТ8		100	290	1,89
	Сплав АК4-1	10	330	1,67
	Сплав ВТЗ-1	100	300	1,82
			360	1,0
	Сплав ВТЗ-1	10	200	1,78
		100	110	3,22
		200	110	3,22
	Сталь	10	170	2,12
	13X11H2B2MФ	100	105	3,45
	(отпуск 580 °С)	200	200	1,76

64

N⁰	Состояние поверхности	Предел выносли-	K _σ ^{φp}	Примечание
п/п	в зоне контакта	вости $\sigma_{-1}^{\phi p}$, МПа	0	
1	Шлифование	180	2,78	Образец и
2	П.1 + покрытие Ад	260	1,92	накладка из стали
3	П.1 + покрытие Ni—Cd	225	2,22	13X11H2B2MΦ
4	П.1 + покрытие ДиФ—СФ	170	3,24	(отпуск 580 °С)
5	П.1 + упрочнение роликом	320	1,56	σ _{−1} =550 МПа,
6	П.5 + покрытие Ад	310	1,61	р=450 МПа
7	П.5 + покрытие Ni—Cd	330	1,52	
8	П.5 + покрытие ВАП-2			
9	Шлифование + пескоструйная	130	3,85	Образец и накладка
	обдувка			из стали
10	П.9 + покрытие Ni—Cd	180	2,78	15Х16Х15Н2МВФАБ
11	П.9 + покрытие Ni—TiC	180	2,78	(отпуск 650 °С)
12	П. 9 + покрытие Ni-TiC-Cd	170	2,94	$\sigma_{-1} = 500 \text{ M}\Pi a$,
13	Шлифование + упрочнение	170	2,38	р=450 Мпа
	микро шариками			-
14	П. 13 + покрытие Ni—TiC	210	2,38	
15	П. 14. + виброшлифование	200	2,5	

Результаты испытании на фреттинг-усталость при «жестком» нагружения для различных состояний поверхности в зоне контакта. Симметричный изгиб, $T_{ucn} = 20$ °C, $N = 2 \cdot 10^7 \mu$ [14]

Исследования на фреттинг-усталость, выполненные на алюминиевом сплаве АК4-1, титановом сплаве ВТ8, в сталях мартенситного класса, показали, что для кривых усталости характерно малое значение показателя m.

Для сплава АК4-1 оно находится в пределах 2,4 ... 3,3, однако кривые имеют перелом в диапазоне (2 ... 5) х 10^6 циклов, а значения т значительно увеличиваются, что свидетельствует о возможности прогнозирования предела выносливости на долговечность N х 10^6 циклов

2.7.1. Изменение электросопротивления в зоне контакта

Одним из способов наблюдения за процессами фреттинга является регистрация изменения электросопротивления в зоне контакта. Для этой цели через сопряжённые детали от источника постоянного тока на самописец типа ЭПП-09 подавалось напряжение. При отсутствии повреждений на контактных поверхностях деталей омическое сопротивление между ними было равно нулю. С возникновением повреждений и появлением в контакте продуктов коррозии сопротивление изменялось от нескольких *Ом* до сотен *Ком*, т.е. повышалось на порядки.

Регистрация изменения электросопротивления в зоне контакта осуществлялась при испытаниях на повреждение от фреттинга в течение N = $2.7 \cdot 10^5$ циклов, а при испытаниях на фреттинг-усталость - могла превышать N> $2 \cdot 10^7$ циклов.

Анализ записей изменения электросопротивления в процессе испытаний (рис. 2.5 и 2.6), хотя и не позволяет сделать количественных выводов, однако даёт представление о кинетике процесса в зоне контакта. Этот метод показал, что процесс повреждения поверхностей и образования продуктов коррозии в зоне контакта наступает очень быстро. Например, значимое изменение сопротивления в электрической цепи для пар «алюминий-алюминий», «стальсталь» или «алюминий-сталь» обнаруживается уже через минуту, т.е. уже после нескольких циклов нагружения. Постоянное скачкообразное изменение электросопротивления свидетельствует о локальном характере повреждений, когда в зоне контакта происходит непрерывное образование и разрушение прослоек из продуктов износа и окислов.

В то же время, наблюдается качественное различие между отдельными режимами испытаний и разными материалами. Например, если при испытаниях в условиях фреттинга наблюдался очень большой рост электросопротивления в парах «сталь-сталь», «сталь - A1», «A1 - A1», то в парах «Ті - Ті» и «Ті - сталь» (см. рис. 2.6) существенных изменений электросопротивления практически не фиксировалось.

Следует отметить, что при таких исследованиях характер изменения электросопротивления соответствовал степени повреждения образца, определявшейся по изменению массы. Случаям минимального изменения массы соответствовало слабое или полное отсутствие изменения

электросопротивления.



Рис. 2.5. Изменение электросопротивления в зоне контакта в процессе испытаний на фреттинг-усталость для пары сталь 13X11H2BMФ - сталь 13X11H2BMФ



Рис. 2.6. Изменение электросопротивления в зоне контакта для пар следующих сплавов на кривых:1-АК4-1 - АК4-1; 2-ВТ8 - ВТ8 в процессе испытаний на фреттинг-усталость

Примененные методы исследований, хотя и помогают получить сведения о важных параметрах процесса.

В отличие от рассмотренных методов исследования повреждений

металлографические и металлофизические методы являются более информативными, так как позволяют выявить особенности изменения структурного состояния повреждённых слоев, химический и фазовый состав продуктов повреждения и их размеры, а также характер развития повреждений, образования микро- и макротрещин и т.д.

2.8. Методы повышения сопротивления фреттинг-усталости

Повреждение поверхностей контакта связано с рядом факторов, определяющих процесс фреттинга, которые действуют одновременно во взаимосвязи, образуя единый механизм механо-физико-химических процессов. Роль каждого из факторов в частном случае проявляется по-разному, что затрудняет разработку универсальных методов борьбы с фреттинг-усталостью.

К мероприятиям, уменьшающим амплитуду относительных перемещений, можно отнести конструктивные решения, включающие для прессовых соединений увеличение натяга, а для малоподвижных соединений- повышение демпфирующих свойств конструкции, способствующих снижению переменных напряжений.

Основными методами, способствующими повышению сопротивления фреттинг-усталости деталей, являются:

 поверхностные упрочняющие обработки, включающие поверхностное пластическое упрочнение, или химико-термические обработки;

 повышение термодинамической стабильности поверхностного слоя за счет его физико-химической модификации, нанесение изоляционных покрытий;

 изменение коэффициента трения в зоне контакта за счет применения твердых смазок на основе дисульфид молибдена типа ВАП, гальванических или диффузионных покрытий и др.;

— подбор контактирующих пар материалов и защитных покрытий, играющих роль протектора и препятствующих электрохимической коррозии

материала в зоне контакта.

Для деталей ГТД, эксплуатирующийся при температурах, не превышающих температуру старения материала, наиболее эффективными являются поверхностные упрочняющие обработки В сочетании С антифрикционными покрытиями (ВАП: Ni- Cd, Ag, Ni–Inu др.).

Для повышения износостойкости антивибрационных полок лопаток применяют детонационное напыление площадок контакта. Однако повышая износостойкость, процесс напыления почти в два раза снижает предел выносливости (см. табл. 2.4), что соизмеримо с повреждением материала фреттинг-коррозией.

2.8.1.Электрические методы

Основаны на использовании главным образом слабых постоянных токов и электростатических полей; позволяют обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты в изделиях из металлических и неметаллических материалов и различать некоторые марки сплавов между собой.

2.8.2.Капиллярные методы

Основаны на явлении капиллярности, то есть, на способности некоторых веществ проникать в мелкие трещины. Обработка такими веществами повышает цвето- и светоконтрастность участка изделия, содержащего окружающей относительно поверхностные трещины, ЭТОТ участок неповреждённой поверхности. Эти методы позволяют обнаруживать поверхностные трещины раскрытием более 0,01 мм, глубиной от 0,03 и протяжённостью от 0,5 мм в деталях из непористых материалов, в том числе, в деталях сложной формы, когда применение другие методов затруднено или исключено.

2.8.3.Капиллярные дефектоскопы

Капиллярный дефектоскоп представляет собой совокупность приборов капиллярного неразрушающего контроля. Капиллярный контроль основан на искусственном повышении свето- и цветоконтрастности дефектного участка Методы капиллярной относительно неповреждённого. дефектоскопии позволяют обнаруживать невооружённым глазом тонкие поверхностные трещины и др. несплошности материала, образующиеся при изготовлении и эксплуатации деталей машин. Полости поверхностных трещин заполняют специальными индикаторными веществами (пенетрантами), проникающими в них под действием сил капиллярности. Для так называемого люминесцентного метода пенетранты составляют на основе люминофоров(керосин, нориол и др.). На очищенную от избытка пенетранта поверхность наносят тонкий порошок белого проявителя (окись магния, тальк и т. п.), обладающего сорбционными свойствами, за счёт чего частицы пенетранта извлекаются из полости трещины поверхность, обрисовывают контуры трещины и ярко светятся в на ультрафиолетовых лучах. При так называемом цветном методе контроля пенетранты составляют на основе керосина с добавлением бензола, скипидара и специальных красителей (например, красной краски).

2.8.4.Экспериментальные методики для исследования зарождения

До середины 1990-х годов наиболее известные схемы исследования фреттинг-усталости предусматривали использование обычных плоских образцов для усталостных испытаний с двумя контртеламинакладками в виде "мостика" (рис. 2.7, а), прижимаемыми заданным усилием к рабочей части образца посредством динамометрических колец. При растяжении-сжатии или изгибе образца вследствие циклической деформации его рабочей части наблюдается скольжение контртел относительно образца и реализуются условия фреттинг-усталости в зоне контакта образца с контртелом, в результате чего разрушение происходит за счет ускоренного роста фреттинг-усталостных трещин на одной из наружных границ контакта контртела с образцом. Далее строятся кривые фреттинг-усталости для постоянного усилия прижатия контртел, которые сравниваются с кривыми усталости для идентичных образцов без накладок.



Рис. 2.7. Схемы испытания на фреттинг-усталость: а – с накладками в виде "мостика"; б автономная триб система с цилиндрическими или сферическими контртелами.

Кажущаяся простота экспериментальной методики имеет обратную сторону: условия контакта в "ножках" контртел трудно точно оценить ввиду возможного их-изгиба и несимметричности скольжения относительно образца при симметричности нагружения. Для адекватного описания НДС в зоне контакта образца с контртелом требуются дополнительные трибологические испытания (построение зависимости коэффициента трения от усилия прижатия и амплитуды циклического скольжения накладки).

В последнее время многие исследователи используют более сложное испытательное оборудование, схематически представленное нарис. 2.7,6, Цилиндрические или сферические накладки, закрепленные в направляющих актюатора или поворотных цапфах испытательной установки, прижимаются заданным усилием к поверхностям плоского образца, после чего происходит его нагружение циклическим растяжением "Сжатием или изгибом с варьируемыми амплитудой скольжения, нормальной и тангенциальной нагрузками в зоне контакта контртела с образцом с помощью специального приспособления или автономного возбудителя колебаний.

При этом трибологические параметры фиксируются в ходе эксперимента на фретгинг-усталость, а НДС в зоне контакта цилиндр-плоскость или сфераплоскость описывается с использованием аналитических решений для контактной задачи.



Рис. 2.8. Схемы для реализации условий фреттинг-усталости в хвостовике лопатки (а) и в узле сопряжения деталей авиадвигателя (б).

Другие экспериментальные методики основаны на воспроизведении геометрии и условий фреттинга реальных конструктивных элементов, в частности, моделировании крепления хвостовика лопатки в диске в виде "ласточкиного хвоста" в установке Руиза (рис. 2.8,а) и в узле сопряжения деталей авиадвигателя (рис. 2.8,б).

Однако наиболее распространенный эксплуатационный случай - фреттинг в цилиндрических валах с напрессованными муфтами или деталями сопряжения не получил широкого отражения В экспериментальных методиках, базирующихся на подходах механики разрушения, в связи со сложностью описания НДС и, в частности, кинетики роста полуэллиптических краевых фреттинг-усталостных трещин в цилиндрических образцах. В работах, описывающих комплексные трибосистемы для испытания на фреттингусталость цилиндрических валов, результаты трактуются с точки зрения трибофатики (взаимовлияния процессов износа, фреттинг-коррозии и усталостной прочности), что выходит за рамки анализируемых методик прогнозирования долговечности при фреттинг-усталости с позиций механики разрушения. Ранее были воспроизведены условия контакта цилиндрического образца с вогнутыми цилиндрическими контртелами того же диаметра. При этом были разработаны и реализованы экспериментальные и расчетные методики как для плоских образцов из титанового и алюминиевого сплавов, так и для цилиндрических образцов из ряда сталей (рис. 2.9).





Рис. 2.9. Схема испытаний на фреттинг-усталость (а) и используемые образны (б) : 1 -плоский образен; 2-цилиндрическая накладка; 3-поворотные цапфы; 4-калиброванное кольцо с тензодатчиками; 5 - захваты испытательной установки для циклических испытаний. При оценке экспериментальных результатов по фреттинг-усталости с
позиций механики разрушения используются различные решения и аналогии для расчета коэффициентов интенсивности напряжений (КИИ) в вершине наклонной и нормальной трещины в зоне фреттинга. Рассмотрим эти решения и аналогии.

2.8.5. Расчетные методики для описания развития трещин фреттинг-усталости.

Для описания контактной задачи в зоне фреттинга в основном используются классические формулы Руке–Джонса, предложенные для трещины в полуплоскости, на берегах которой действуют точечные силы: нормальная Р и тангенциальная $Q(Q = \mu P)$, гае μ - коэффициент трения) - рис. 2.10.



Рис. 2.10. Схематическое представление трещины глубиной а на расстоянии Ъ от края контакта, используемое в расчетах по формулам Руке –Джонса.

Для нормальной трещины коэффициенты интенсивности напряжений от точечных погонных усилий Р и О составляют:

$$K_{IP} = \left(-\frac{P}{\sqrt{\pi a}}\right)(1-\xi^2)(0,824+0,063\xi-0,843\xi^2+15,41\xi^3-53,38\xi^4+$$

$$59,74\xi^5-21,82\xi^6); \qquad (2.5)$$

$$K_{IQ} = \left(-\frac{Q}{\sqrt{\pi a}}\right)(1-\xi^2)(1,2949+0,0044\xi+1,1281\xi^2+10,89\xi^3-22,14\xi^4+$$

10,96
$$\xi^5$$
); (2.6)

$$K_{IIP} = \left(-\frac{P}{\sqrt{\pi a}}\right)(1-\xi^2)(1,294-1,184\xi+5,442\xi^2-28,14\xi^3+41,8\xi^4-22,38\xi^5+3,162\xi^6);$$
(2.7)

$$K_{IQ} = \left(-\frac{Q}{\sqrt{\pi a}}\right)(1-\xi^2)(0,824+0,063\xi-0,843\xi^2+15,41\xi^3-53,38\xi^4+59,74\xi^5-21,82\xi^6);$$
(2.8)

$$\Gamma_{IIE} \xi = b/(a+b).$$

Для перехода от точечных сил к распределенным используются следующие схемы суммирования точечных сил Р и Q по различным законам распределения вдоль линии контакта: равномерная; треугольная и обратная треугольная; параболическая и обратная параболическая и т.д.

Формулы (2.5) для упругой полуплоскости используются разными исследователями для расчета КИП в плоских образцах с накладками в виде мостика. При этом для упрощения задачи применяются различные допущения.

В работах постулируется начальный рост трещины по нормали к оси нагружения по типу K_I или ее переход в нормальную плоскость при очень малых длинах трещины, в результате чего ее наклонным участком можно пренебречь. Ввиду неоднозначности влияния K_{II} и на скорость роста усталостной трещины (РУТ) в случае ее развития по типу КI постулируется, что оно отсутствует, а учитываются только составляющие K_{II} точечных сил Р и Q согласно формулам (2.5) и (2.6).

По мере развития расчетных методик для описания КИП в вершинах наклонных трещин фреттинг-усталости используются модифицированные формулы Руке–Джонса, функции Грина и метод весовых функций, подробно описанные в работах.

В расчетах, основанных на применении модифицированных формул Руке–Джонса, обычно постулируется наличие исходного дефекта размером 2-3 размера зерна материала. Затем с использованием экспериментально измеренных триботехнических параметров (амплитуды скольжения контртела по образцу А, величины контактной нагрузки Р и коэффициента трения и между контртелом и образцом) и заданной амплитуды циклического напряжения. Откол задаются граничные условия (в напряжениях) для берегов указанной трещины и вычисляются значения КИП (К_I и К_{II}) для каждой составляющей. Суммарные значения КИИ определяются в упругой постановке путем суперпозиции контактных и объемных составляющих.

Поскольку для трещин в зоне фреттинга величина коэффициента интенсивности контактных напряжений обратно пропорциональна квадратному корню длины трещины, даже при малых уровнях контактной нагрузки P в зоне фреттинга (50... 100 МПа) сила трения $Q = \mu P$ обеспечивает высокий уровень КИИ в вершине зародившейся микротрещины и его снижение помере роста микротрещины и ее ухода из поверхностного слоя. Ранее формулы (2.5) и различные схемы распределения контактных нагрузок использовались в расчетной программе для определения КИН в вершине трещины фреттингусталости в конструкционных сталях.



Рис. 2.11. Эквивалентность контактной задачи с жестким штампом (a) и задачи об образце с двумя краевыми надрезами (б) согласно аналогии.

В последнее время в качестве альтернативы вышеописанным методикам, базирующимся на формулах Руке –Джонса, широко используется подход, основанный на аналогии между НДС в вершине трещины, растущей у края контакта плоского штампа с полуплоскостью (рис. 2.11,а), и трещины, растущей в полуплоскости из вершины V-образного надреза (рис. 2.11,б). Эквивалентность этих задач достигается путем преобразования координат в Рис. 2.11. Эквивалентность контактной задачи с жестким штампом (а) и задачи об образце с двумя краевыми надрезами (б) согласно аналогии.

При этом действие нормальных Р и тангенциальных Q погонных усилий прижатия штампа (контр тела) в первой задаче аналогично приложению глобальных коэффициентов интенсивности напряжения К_I и К_{II} во второй задаче, где

$$K_I = -P/\sqrt{\pi a}$$
; $K_I = -Q/\sqrt{\pi a}(2.9)$

Как видно из формул (2.9) и (2.5), составляющая K_I от нормального усилия прижатия P отрицательна и не изменяется при изменении направления действия объемных сил при циклическом растяжении-сжатии, поскольку усилие прижатия является постоянным. В то же время при циклическом скольжении контртела относительно образца изменяются значение и (или) направление тангенциальных погонных усилий Q,а следовательно, и составляющая K_{II} от Q. При асимметрии цикла объемного нагружения (R=-1) размах этой составляющей достигает наибольшего значения (удваивается по сравнению с таковой при пульсирующем цикле нагружения R = 0):

$$\Delta K_{II} = 2Q/\sqrt{\pi a} \tag{2.10}$$

Таким образом, контактная задача сводится к действию глобальных коэффициентов интенсивности напряжения К_I и К_{II} на линии контакта плоского штампа (контртело) с телом (плоский образец).

Как указывалось выше, исследование процесса фреттинга и влияние отдельных его факторов на сопротивление усталости материалов проводились на стандартных круглых образцах, предназначенных для испытаний при изгибе с вращением. Конструкция образца представлена на рис. 2.12.



Рис. 2.12. Конструкция образца





Рис. 2.13. Конструкция сухаря



Рис. 2.14. Конструкция образцов для испытания на плоский изгиб и схема испытаний 1 - образец; 2 - накладки. 3 - упругие элементы; 4 - шпильки с тензорезисторами.

Вторым необходимым элементом для первого этапа испытаний являлись сухари (рис. 2.13).

В качестве материалов для этих деталей были выбраны нержавеющая сталь мартенситного класса ЭИ-961. титановые сплавы ВТЗ-1 и ВТ8, а также сплав АК4-1.

Выбор указанных материалов, с одной стороны, основывается на том, что они являются типичным для лопаток и дисков компрессоров, современных ГТД. поэтому полученные при исследованиях данные могут найти прямое практическое применение. С другой стороны, общим для этих материалов является высокая чувствительность к концентрации напряжений q_{σ} , определяемый как $q = \frac{K_{\sigma}-1}{\alpha_{\sigma}-1}$.

где K_{σ} -эффективный коэффициент концентрации напряжений, равный отношению предела выносливости гладкого образца σ_{-1} к пределу выносливости образца с концентратором напряжений σ_{-1}^{k} , α_{σ} теоретический коэффициент концентрации, то величина q для этих материалов оказывается близкой к единице и колеблется в диапазоне 0,8 ÷ 0,98.

Последнее свойство указанных материалов позволяет более контрастно выявить не только влияние процесса фреттинга на сопротивление усталости, но и определить роль отдельных факторов этого процесса.

Сопротивление усталости конструкционных материалов в условиях фреттинг-коррозии исследовалась на плоских образцах (рис. 2.14). Контактные условия имитировались помощью накладок 2.14), которые с (рис. устанавливались в средней части образца. Давление в зоне контакта создавалось при затяжке шпилек через упругие элементы в виде дуговых рессор. Величина усилия задавалась и контролировалась по деформации шпилек, замеряемой с помощью наклеенных на них тензорезисторов по измерителю деформаций типа ЭИД-3.

Глава 3. Сопротивление МнЦУ замковых соединений лопаток компрессора

Рабочие лопатки компрессора – одни из наиболее ответственных деталей, от конструктивного совершенства и долговечности которых зависит качество компрессора, и надежная работа двигателя в целом. Рабочие лопатки работают в сложных условиях. На них действуют инерционные и аэродинамические силы, вызывающие напряжения растяжения, изгиба и кручения. Центробежная сила, создаваемая лопатками вентилятора, может превышать 300...600 кН.

3.1.Влияние на МнЦУ лопаток компрессора особенностей сопряжения хвостовика лопатки с дисковым элементом

Лопатки испытывают существенные вибрационные напряжения вследствие колебаний, которые в итоге воспринимаются замковой частью.

Замковые элементы подвержены разрушению отфреттинг- усталости. Вопросы обеспечения конструкционной прочности лопаток компрессоров являются определяющими в формирования надёжности компрессора.

На кафедре – двигателей в МАТИ совместно с отделом прочности ЦИАМ проведены исследования по оценке прочности лопаток компрессоров ТРД при действии фреттинг-коррозии. Особый интерес представляют модели лопаток, имевших различия в сопряжении хвостовиков с выступами дисков:

1) податливое врезание выступа диска в хвостовик лопатки;

2) жесткое врезание выступа диска в хвостовик лопатки;

3) нависание выступа диска над хвостовиком лопатки.

Сопоставляя полученные результаты по напряжениям в условном сечении хвостовика, можно отметить, что наиболее неблагоприятным оказался вариант 2, для которого предел выносливости составил σ_a = 90 МПа на базе N=10⁸ц.

Таблица. 3.1

				Ис	следов	анные	вариан	ТЫ		
		Ι	II	Ш	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	Предел	95	120	145	120	90	120	100	100	100
Условное	выносливости,									
сечение	$\sigma_{-1},$ МПа									
	K _σ	5.8	4.58	4.8	4.58	6.1	4.58	5.5	5.5	5.5
Сечение с	Предел	150	190	240	145	109	162	135	168	168
наибольшими	выносливости,									
изгибающими	σ ₋₁ , ΜΠа									
моментами	K _σ	3.66	2.9	2.28	3.8	5.04	3.4	4.07	3.27	3.27
Напряжения с	мятия, $\sigma^{\rm p}_{\rm cm}, {\rm M}\Pi{\rm a}$	340	340	340	400	800	260	520	210	365

Результаты испытаний на МнЦУ замковых соединений лопаток компрессоров





I - вариант модели -податливое врезание выступа диска в хвостовик лопатки- 1; 2 –податливое врезание выступа диска в хвостовик лопатки вариант-II; 3 –нависание выступа диска над хвостовиком лопатки- вариант III. (варианты по табл.3.1).



Рис. 3.2. Кривые усталости замковых соединений из стали 13Х11Н2ВМФ △ - вариант I, •2 – вариант II (варианты по табл.3.1). Цифры у значка 2,3,4 – число испытанныхмоделей.





Для вариантов 2 выносливости $\sigma_a = 90$ и Зпределы выносливости $\sigma_a = 140$ МПа оказались практически одинаковыми на уровне 120МПа. Исследовано влияние на предел выносливости напряжений смятия, влияние угла клина на НДС хвостовика, влияние соотношения изгибной жёсткости хвостовики и профильной части лопатки, уровня напряжений смятия в диапазоне от $c_{\rm M} = 260$ МПа до $\sigma_{\rm CM} = 400$ МПа. Получено распределение эпюр переменных напряжений изгибающего момента по высоте контактной грани хвостовика, позволяющего определить положение опасного сечения хвостовика.

Координаты мест разрушения хвостовиков, когда диск «жестко» врезается в хвостовик практически совпадает с границей контакта хвостовика с диском при этом отношение m_{тр}/m_{отп} составляет 0,988.

Во втором случае зона разрушений перемещается на некоторое расстояние от его минимального сечения и опасное сечение располагается на ~ 0,16m от верхней границы хвостовика.

Представленные в табл.3.1 данные содержат результаты исследований

динамической напряженностью хвостовиков, и были определены опасные сечения для хвостовиков различных конструктивных вариантов, которые хорошо совпадают с результатами, полученными при испытаниях на МнЦУ.

3.2. Прогнозирование сопротивления усталости замковых соединений лопаток компрессора

Из анализа результатов динамического тензометрирования и координат возникновения очагов разрушения хвостовиков, полученных при испытаниях на МнЦУ и в эксплуатации можно заключить, что опасное сечение хвостовика не совпадает с границей контакта его с выступом диска, а в общем случае смещается от этой границы примерно на 0,15...0,2 высоты хвостовика, граница контакта смещается внутрь площадки. Основным повреждающим фактором в замковом соединении является фреттинг-усталость.

Предельная амплитуда напряжений для материала определяется из выражения(2.5)

$$\sigma_{-1}^{\phi p} = \left(\sigma_{-1}^{\phi p}\right)^* - \psi_{\sigma}\sigma_{m}, \qquad (3.1)$$

$$\sigma_{-1}^* = \overline{\sigma}_{-1} - u_{1-P} S_{\sigma-1}, \qquad (3.2)$$

где σ_{-1}^* минимальное значение предела выносливости σ_{-1}^* материала находят из выражения(3.2):

где $\overline{\sigma}_{-1}$ — среднее значение предела выносливости,

u_{1-P} — односторонний квантиль нормального распределения предела выносливости.

Предел фреттинг-усталости материала может быть определен из результатов исследования влияния параметров процесса фреттинг-коррозии на интенсивность процесса фреттинг-усталости. Обязательным требованием при этом должно быть максимальное приближение параметров процесса фреттинга А_р, р, v для исследуемой конструкции к эксплуатационным.

Замковые соединения относятся к особо ответственным элементам конструкции, поэтому их несущая способность исследуется на натурных элементах или на моделях в условиях, близких к эксплуатационным, что позволяет более точно прогнозировать ресурс конструкции.

Чувствительность материала к фреттинг-усталости выражается так:

$$K_{\sigma}^{\phi p} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1}^{\phi p}}.$$
(3.3)

В общем случае значение $\sigma_{-1}^{\phi p}$ может быть получено экспериментально. Конструктивные и эксплуатационные факторы, оказывающие влияние на динамическую напряженность хвостовика, обозначим коэффициентом φ с соответствующим индексом, а технологические факторы (упрочняющие обработки, защитные покрытия и т. д.) коэффициентами β_{n} и δ_{n} . Тогда значение эквивалентного коэффициента [5]

$$(K_{\sigma}^{\phi p})_{_{3KB}} = K_{\sigma}^{\phi p} \varphi_{\text{kecr}} \varphi_{k} \varphi_{\alpha} \varphi_{p} \frac{1}{\beta_{\Pi} \delta_{\Pi}}.$$
(3.4)

В табл. 2.4, 2.5 и 3.2 приводятся значения $K^{\phi p}_{\sigma}$ для замковых соединений лопаток компрессоров и для типичных конструкционных материалов, применяемых в ГТД, полученные при "мягком" и "жестком" нагружениях в условиях фреттинг-усталости.

При повышенных и нормальных температурах интенсивность процесса фреттинг-коррозии принимается одинаковой.

Величина предельной амплитуды $(\sigma_{\alpha}^{\varphi p})_{_3}$ для хвостовика лопатки определится из выражения

$$\left(\sigma_{\alpha}^{\phi p}\right)_{3} = \frac{\sigma_{-1}^{*}}{\left(K_{\sigma}^{\phi p}\right)_{_{3KB}}} - \psi_{\sigma}\sigma_{m}.$$
(3.5)

При вычислении, запаса прочности по переменным напряжениям используют приведенную амплитуду действующих переменных напряжений.

Таблица 3.2

Кфр пля условного сечения и сечения с наибольшим Данные о пределах выносливости замковых соединении и значения илиентивных возманиентов конпентивные

Условное сечение	Предел выносливости,					Иссл	едова	нные	вари	AHTЫ				
	$(\sigma_{-1}^{\text{pp}})_{a}$, MIIa	I	н	Η	IV	Λ	IV	ΠΛ	ШЛ	IX	Х	XI	ПХ	ШХ
		95	120	145	120	90	120	100	100	100	15	45	20	55
	К ^{фр}	5,6	4,58	3,89	4,58	6,1	4,58	5,5	5,5	5,5	14,4	10,7	10,8	8,74
Сечение с наибольшим изгибающим моментом	Предел выносливости $(\sigma_{-1}^{\phi p})_3$, МПа	150	190	240	145	109	162	135	168	168	27	84	40	102
-	K ^{4p} _G P	3,66	2,9	2,35	3,8	5,04	3,4	4,07	3,27	3,27	8	5,72	5,40	4,71
папряжение смятня Т _{исп} , °С	$\sigma^{\rm P}_{\rm cst}$, MIIa	340	340	340	400 20	800	260	520	210	365	20	250 400	20	400
Материал				CTaJ	113X	11H2E	32MΦ				CILIAB	BT3-1	CILIAB F	8T10

3.3. Влияние видов конструктивного сопряжения хвостовиков, лопаток и пазов дисков на фреттинг-усталость замковых соединений. Влияние на усталость конструктивных факторов. Роль масштабного фактора

Кроме определения предела выносливости цель испытаний на усталость замковых соединений — выявить роль в формировании сопротивления усталости таких факторов, как конструктивные особенности сопряжения хвостовика с диском, влияние, напряжений смятия и технологических процессов изготовления хвостовиков эффективность применяя упрочнения, защитных покрытий, влияние материала температуры испытаний и др.



Рис.3.5. Кривые вероятности Р распределения сечений Н разрушения хвостовиков:





Рис. 3.6 Зависимость относительного значения предела выносливости (σ_a)_{отн} от угла наклона контактной грани (α) и от относительного значения напряжения смятия (б)



Рис. 3.7. Кривые усталости замковых соединений из стали 13Х11Н2В2МФ и титановых сплавов

1-сталь 13Х11Н2В2МФ, 2-сталь 13Х11Н2В2МФ покрытие Ag и гидрогалтовка, 3- сплав ВТ10 и 4- сплав ВТ3-1, T_{исп} = 400°С

К типичным сопряжениям хвостовика с диском относятся (см. рис. 3.5):

- а) податливое врезание выступа диска в хвостовик (вариант 1);
- б) жесткое врезание выступа диска в хвостовик (вариант 2);
- в) податливое нависание выступа диска над хвостовиком (вариант 3).

Из анализа результатов испытаний на усталость следует, что минимальное значение предела выносливости имеют замковые соединения с податливым врезанием, а максимальное - с жестким врезанием.

Это подтверждается и анализом мест разрушения (опасных сечений) хвостовиков. На рис. 3.5 приведены кривые распределения опасных сечений хвостовиков по высоте для рассмотренных типов сопряжения. В качестве случайной величины \overline{H}^{xB} принималось отношение H_{Tp}^{xB}/H_{oTn}^{xB} . Можно отметить, что при податливом нависании, когда H_{oTn}^{xB} совпадает с минимальным по площади сечением хвостовика, значение \overline{H}^{xB} для опасного сечения составляет 0,87, т. е. это сечение перемещается в сторону больших сечений хвостовика (см. рис. 3.5). При жестком врезании значение $\overline{H}^{xB} \approx 1$, т. е. опасное сечение совпадает с границей контакта. При податливом врезании $\overline{H}^{xB} \approx 0,85$ опасное сечение смещается в сторону больших сечений. В общем случае для опасного сечения можно принять значение $\overline{H}^{xB} = 0,85$.

Из зависимости $[\sigma_{\varphi}]_{\text{отн}} = f(\varphi)$,представленной на рис. 3.6 следует что минимальное значение предела выносливости соответствует $\varphi = 45^{\circ}$, а максимальное для $\varphi = 70^{\circ}$. Это хорошо согласуется с результатами динамического тензометрирования. Влияние покрытий и температуры испытаний на усталость замковых соединений можно проследить по результатам испытаний хвостовиков из стали 13X11H2B2MФ и титановых сплавов ВТ10 и ВТ8. Данные (рис. 3.7) показывают, кроме того что значения $K_{\sigma}^{\phi p}$ практически не зависят от масштабного фактора, хотя характерные геометрические размеры хвостовиков отличались в 2 ... 2,3 раза (кривые 3 и 4).

Сравнение пределов выносливости вариантов 3 (сплав ВТ10) и 4 (сплав ВТ3-1), отличавшихся размерами примерно вдвое, свидетельствует не столько о влиянии на сопротивление усталости замковых соединений масштабного фактора, сколько о влиянии технологических факторов.

3.3.1.Влияние на усталость напряжений смятия

Представленная на рис. 3.6 зависимость относительной величины предела выносливости замковых соединений от относительной величины напряжений смятия и определенная для различных материалов с учетом разрушающих напряжений близка к линейной. Величина напряжений смятия варьировалась в широком диапазоне напряжений от 260 до 800 МПа.

Сравнительно небольшое снижение пределов выносливости при значительном напряжений увеличении смятия свидетельствует 0 второстепенной их роли в формировании несущей способности замкового соединения по крайней мере при значениях $\sigma^p_{\rm cm} \gg 100$ МПа. Это хорошо согласуется и с результатами исследований по фреттинг-коррозии и фреттингусталости.

3.3.2.Влияние на усталость технологических факторов

Хвостовики лопаток компрессоров чаще обрабатываются фрезерованием с последующим шлифованием, но иногда профиль хвостовиков получается протягиванием. В обоих случаях в поверхностном слое образуются как сжимающие, так и небольшие растягивающие остаточные напряжения. Следствием этого является повышенное рассеяние результатов при испытаниях на усталость.

Стабилизация свойств поверхностного слоя обычно достигается либо термообработкой либо окончательно готовой детали, поверхностным упрочнением. Для защиты хвостовиков от фреттинг-коррозии, повышения демпфирующих свойств соединения и упрощения сборки (разборки) на контактные грани хвостовиков наносят антифрикционные покрытия типа BAII, гальваническое серебро Ag или гальваническое покрытие Ni — Cd, при этом для подготовки поверхности применяется обдувка абразивом площадок контакта, которая не только повышает адгезионные свойства поверхности, но и несколько стабилизирует свойства поверхностного слоя, наводя в нем сжимающие остаточные напряжения. Прослойка из менее прочного, но пластичного материала образует между контактирующими поверхностями свойств положительный градиент механических материала, снижает коэффициент трения, уменьшает величину касательных напряжений и увеличивает амплитуду относительных перемещений между хвостовиком и выступом диска.

Образование после упрочняющих обработок в поверхностном слое хвостовиков сжимающих напряжений не устраняет на площадках контакта процесса фреттинга, однако развитие разрушения замедляется при благоприятной асимметрии цикла в поверхностном слое. Упрочняющие обработки хвостовиков способствуют повышению предела выносливости замковых соединений на 25...50 % и более, а защитные покрытия типа ВАП, Ag, Ni или Cd с учетом предварительной подготовки поверхности повышают предел выносливости на 10...15 %.

3.3.3.Влияние на усталость температуры испытаний и материала

Предел выносливости замковых соединений из коррозионно-стойких сталей в диапазоне температур 20...400°С практически не изменяется, а у наклепанных хвостовиков предел выносливости при температурах свыше 300°С снижается примерно на 20 %.

Сопротивление усталости замковых соединений из титановых сплавов при температурах свыше 300°С снижается вдвое. Например, предел выносливости хвостовиков из сплава ВТ8, упрочненных ультразвуком и покрытых ВАП или Ag, на базе N = 10^8 циклов при T_{исп} = 450° С составил 55 МПа, в то время как при T_{исп} = 20° С σ_{α} более 130 МПа.

Сравнивая несущую способность однотипных замковых соединений, выполненных из различных конструкционных металлических материалов, сплава ВТ8, сплава ХН77ТЮР и коррозионностойкой стали аустенитного класса ХН45МВТЮБР-ИД, подвергнутых упрочнению ультразвуком И имевших покрытие Ag или ВАП, можно отметить, что максимальный предел выносливости $\sigma_{\alpha} = 120$ МПа получен для сплава ХН77ТЮР и стали ХН45МВТЮБР-ИД, а минимальный — для ВТ8 (σ_{α} = 55 МПа). Это позволяет заключить, что наименее чувствительным к фреттинг-коррозии — фактору, определяющему несущую способность замкового соединения, являются сплав ХН77ТЮР и сталь ХН45МВТЮБР-ИД. Более чувствительны к фреттингкоррозии стали типа 13X11H2B2MФ и особенно чувствительны сплавы BT8, и ВТЗ-1. Поверхностное упрочнение хвостовиков BT10 способствует снижению предельной температуры применения конструкционных материалов примерно на 50°С.

3.4. Установки для испытания на усталость замковых соединений

Усталостная прочность замковых соединений, а также определение динамической напряженности хвостовиков и профильной части моделей вблизи хвостовика осуществлялось на разработанных в ЦИАМе испытательных машинах, известных в текнике как У-361 и У-362.

Установка типа У-361 предназначена для испытаний моделей замковых соединений лопаток компрессоров или турбин, а также образцов при нормальных и повышенных температурах в условиях асимметрии цикла: при симметричном переменном изгибе со статическим растяжением (см. рис. 3.8).



Рис. 3.8. Силовая схема установки типа У-361

Установка состоит из станины замкнутого типа 1, динамометра переменных нагрузок 3, выполняющего одновременно функции захвата, где размещается вкладыш 4 для крепления образца 2; подвижного захвата 5, шарнирно связанного с пластинчатыми рессорами 6, а через них с динамометром статических нагрузок 7 и редуктором.

Переменный изгиб создается с помощью механического эксцентрикового вибратора 10, укрепленного на плоских рессорах 9, связанного с электродвигателем постоянного тока. Возбуждающая сила от вибратора передается образцу через стойку 8 и подвижный захват 5. Статическая нагрузка растяжения передается на образец от электродвигателя переменного тока через редуктор, силовую цепочку, образуемую элементами 7,6,5.



Рис. 3.9. Принципиальная схема автоматического регулирования амплитуды на установке типа У-361

В процессе работы величины P_{CM}и M_aостаются постоянными. Поддержание заданной величины изгибающего момента осуществляется автоматически с помощью амплитудного регулятора. Схема автоматического регулирования амплитуды представлена на рис. 3.9.

3.4.1. Тарировка установки

В отличие от рассмотренных выше машин для испытаний на усталость, обладающих постоянными динамическими характеристиками, на машинах типа У-361 перед испытанием партии образцов необходимо провести ряд тарировок. К ним относятся, динамическая тарировка и температурная, если испытания проводятся при повышенных температурах.

Динамическая тарировка. В процессе испытаний на усталость одним из видов контроля и способов задания величины переменного изгибающего момента является величина прогиба динамометра, наблюдаемая с помощью микроскопа в виде размаха перемещений. Поэтому целью проведения динамической тарировки является получение зависимости между величиной изгибаюшего момента И прогибом динамометра. В принципе эта характеристика является постоянной для данного типа динамометра. Однако непостоянство геометрических параметров и связанной с ними жесткости образцов, условий статического нагружения, оказывающих влияние на резонансные характеристики образуемой ими системы в силовой цепи машины, приводит к существенному различию в распределении эпюры изгибающих моментов в образце, что в конечном счете связано с правильностью определения напряжений в опасном сечении образца.



Рис. 3.10. Распределение изгибающего момента в образце в зависимости от величины статической составляющей

На рис. 3.10 показано, что с увеличением статической нагрузки схема нагружения образца существенно отличается от консольно защепленной балки. Поэтому способ задания нагрузки только по величине результирующего момента на динамометре оказывается непригодным.

Аналогичное изменение изгибающего момента наблюдается у образцов с различной изгибной жесткостью.

Для определения изгибающего момента по всей длине профильной части

образца наклеивается ряд тензодатчиков. Тип и размеры тензодатчиков, а также их расположение по ширине профильной части зависит от особенностей геометрии образца и поставленных перед исследователем задач.



Рис. 3.11. Зависимости деформаций по длине образца от амплитуды перемещений

При заданной величине статической нагрузки на различных режимах по переменным нагрузкам показания тензодатчиков регистрируются, либо с помощью стрелочного прибора, например, измерителя динамических деформаций ИДД-1. или записываются с помощью осциллографа.

В первом случае на шкале прибора непосредственно получают величины относительных деформаций $\bar{\epsilon}$ с точностью до 10^{-5} . Во втором случае величины записанных деформаций сравниваются с помощью тарировочного сигнала, предварительно определенного на камертонной балочке типа КТУ-1.

На основе полученных были построены зависимости (рис. 3.11) между значениями деформаций каждого датчика ε_i и величиной размаха по шкале микроскопа $\varepsilon_i = f(2A)$. Такие зависимости позволяют построить распределение эпюры изгибающих моментов по длине образца для нескольких фиксированных величин перемещений динамометра. Принимается, что линейный закон распределения изгибающего момента действует вплоть до хвостовика. ИИ, наконец, строится рабочий график зависимости величины изгибающего момента в опасном сечении хвостовика от величины перемещений динамометра $M_a = f(2A)$, с помощью которого задаются режимы испытаний.

Температурная тарировка необходима в тех случаях, если усталостная прочность определяется при повышенных температурах. С этой целью весь образец или только часть его, включающая В себя хвостовик И соответствующую часть дискового элемента, помещаются в печь co спиральными нагревателями нихрома. Предварительно ИЗ образец И сопряженный с ним дисковый элемент препарируется термопарами (см. рис. 3.12), Затем, регулируя силу тока в нагревателях различных секций печи и контролируя показания термопар по потенциометру, добиваются получения в рабочей части образца заданного температурного поля.

Наряду с термопарами, закрепленными на образце и дисковом элементе, устанавливаются контрольные термопары, фиксирующие температуру нагревателя или теплового потока в нескольких закоординированкых точках пространства между образцом и нагревателем.



Рис. 3.12. Схема препарирования образца термопарами.

После получения заданного температурного поля в процессе испытаний температурный режим задается и контролируется с помощью этих термопар, а сигнал от них передается на самописец и температурный регулятор. Сведения о температурном поле для замковых соединений из сплавов ВТЗ-1 и ВТ10 представлены на рис. 3.12.

3.5. Исследования напряжённости контактной грани хвостовика при вибрационном нагружении

Напряжённость контактных граней замковых соединений при вибрационном нагружении (рис. 3.13) исследовалась на металлических моделях методом тензометрирования. С этой целью на контактных гранях хвостовиков выполнялись специальные пазы глубиной 0.15 ... 0.2 мм для размещения в них тензорезисторов базой 1-2 мм. Датчики в процессе исследований многократно переклеивались по всей длине контактной грани по заданным координатам. Это позволило получить данные о деформациях в разных сечениях контактных площадок при нагружении хвостовика статическим растяжением И симметричным переменным изгибом. Расстояния между сечениями (при длине контактной грани 12 ... 15 мм) составляли от 0.2 до 0.5 мм. Обобщённые зависимости напряжённости хвостовиков от геометрических и силовых факторов представлены на рис. 3.13.

деформаций осуществлялась с помощью шлейфового Регистрация осциллографа, В качестве опорного сигнала принимались показания расположенного тензорезистора, В корневом сечении, возникали где максимальные деформации профильной части модели лопатки [13, 16, 6].

Анализ полученных результатов показал, что знакопеременный изгибающий момент от профильной части лопатки воспринимается всей рабочей поверхностью хвостовика; при этом максимальные величины изгибающего момента могут превышать значения, экстраполированные по

линейному закону от профиля лопатки до опасного (минимального) сечения хвостовика, на 10 ... 40% в зависимости от геометрии хвостовика и типа сопряжения хвостовика с выступом диска [13, 16, 6]. Максимальная величина изгибающего момента в хвостовике соответствует податливому врезанию выступа диска, а минимальная величина - податливому нависанию выступа диска относительно контактной грани хвостовика.



Рис. 3.13. Влияние на относительную напряжённость хвостовика при вибрационном изгибе геометрических и силовых параметров:

а) зависимость φ_α от угла а наклона контактной грани; б) зависимость φ_{жёст} от соотношения
 между изгибной жёсткостью лопатки и хвостовика; в) зависимость φ_pот изменения

статической составляющей

На напряжённость хвостовика (рис. 3.13), кроме того, оказывают значительное влияние следующие факторы [15, 6]:

величина угла наклона контактной грани хвостовика (рис. 3.13 а);

 соотношение между изгибной жёсткостью профильной части лопатки и хвостовиком (рис. 3.13 б):

— величина статической составляющей (рис. 3.13 в), которая, в свою очередь, влияет на изменение демпфирующих свойств замкового соединения [6,7]. С уменьшением угла а динамическая напряжённость хвостовика

повышается (см. рис. 3.13 а), а с уменьшением жёсткости профиля лопатки снижается (см. рис. 3.13 б). Рост величины статической составляющей вызывает снижение демпфирования в замковом соединении и некоторое повышение его напряжённости.



Рис. 3.14. Распределение относительного изгибающего момента в зоне контакта хвостовика с диском: Δ — податливое врезание диска в хвостовик; О — жёсткое врезание диска; □ — податливое

нависание диска относительно хвостовика

Эпюра изгибающего момента на рабочей грани хвостовика имеет нерегулярный (волновой) характер и даже изменяет знак, что способствует формированию условий для возникновения фреттинг-коррозии практически на всей площадке контакта.

Полученные результаты тензометрирования позволили выявить опасные сечения для хвостовиков, что хорошо согласуется с данными анализа распределения очагов разрушения на контактных гранях хвостовиков,

наблюдавшихся при лабораторных испытаниях на усталость, и сведениями о случаях разрушения в эксплуатации.



Рис. 3.15. Эпюры распределения относительных деформаций по длине контактной площадки зубьев хвостовика ёлочного типа лопатки вентилятора, отнесенных к тензорезистору, который размещён на ножке у основания первого зуба хвостовика:
 а) на первом зубе; б) на втором зубе; в) на третьем зубе

Опасное сечение хвостовика не совпадает ни с границей контакта его с выступами диска, образующими «заделку», ни с минимальным по площади поперечным сечением хвостовика, В общем случае опасное сечение смещается от границы контакта примерно на 0.15 ... 0.2 мм от высоты грани внутрь площадки контакта.

На рис. 3.15 приводятся результаты тензометрирования (с использованием тензорезисторов базой 2 мм) зубьев хвостовика ёлочного типа лопатки вентилятора. Исследования выполнялись по методике, применявшейся для хвостовиков типа "ласточкин хвост" [13,7,30].

Глава 4

Разработка физической модели процесса разрушения деталей при воздействии фреттинга

4.1. Особенности напряженно-деформированного состояния замковых соединений лопаток компрессоров

Анализу напряжённого состояния замковых соединений типа «ласточкин хвост» расчётно-экспериментальных [3,4,2,11,24,31] посвящен ряд И экспериментальных исследований, В которых использовались методы фотоупругости [4,7] и тензометрирования [10]. В них, как правило, изучалось распределение контурных напряжений в галтели паза диска и на площадке контакта в условиях статического нагружения.

4.1.1. Статическое нагружение

При расчётах [1,4,10] принималось, что рабочие грани пазов диска нагружены давлением от лопатки, распределённым по треугольному закону. Взаимным влиянием лопаток пренебрегали, полагая, что угол между осями лопаток достаточно большой.

На рис. 4.1 приведено распределение относительных контурных напряжений в галтели паза диска в зависимости от угла α наклона контактной грани хвостовика. Можно отметить, что с уменьшением угла α с 70 до 45° величина коэффициента концентрации напряжений α_{σ} несколько возрастает (с 2.87 до 3.1). При этом наиболее напряжённая точка смещается от контактной грани замкового соединения к свободной от контакта галтели паза.

Увеличение радиуса галтели паза диска сопровождается снижением коэффициента концентрации напряжений α_σ. Сравнение расчётных значений коэффициента концентрации напряжений α_{σp}с экспериментальными показало,

что экспериментально определённые значения α_{σ_3} выше расчётных примерно на 10% ($\alpha_{\sigma p} = 2.87$; $\alpha_{\sigma_3} = 3.2$), хотя расчёт проводился без учёта сил трения, а при эксперименте на поверхности контакта была использована смазка.

Приведенные в работе [7] расчётные значения коэффициента концентрации напряжений $\alpha_{\sigma p}$ для аналогичных замковых соединений с углом $\alpha = 70^{\circ}$ составляли 1.69. Здесь при решении контактной задачи МКЭ было получено неравномерное распределение контактных напряжений вдоль рабочей грани паза. Максимальные напряжения в зоне контакта более чем в 1.7 раза превышали наибольшие контурные напряжения в галтели паза.



Рис. 4.1. Распределение относительных контурных напряжений и значений α_σ в замковом соединении типа «ласточкин хвост» диска компрессора в зависимости от угла α:
а) α = 45, 60 и 70° при растяжении Р_л; б) контактные и контурные напряжения в галтели при растяжении с изгибом M_и; в) схема нагружения площадок контакта хвостовика лопатки при

Приведенные в работе [7] расчётные значения коэффициента концентрации напряжений $\alpha_{\sigma p}$ для аналогичных замковых соединений с углом $\alpha = 70^{\circ}$ составляли 1.69. Здесь при решении контактной задачи МКЭ было получено неравномерное распределение контактных напряжений вдоль рабочей грани паза. Максимальные напряжения в зоне контакта более чем в 1.7 раза превышали наибольшие контурные напряжения в галтели паза.

На рис. 4.1 б приведены результаты расчёта распределения контактных нагрузок при совместном действии растягивающей и изгибающей нагрузок. В этом случае неравномерность распределения напряжений на площадке контакта замкового соединения увеличивается почти в два раза, в то время как концентрация напряжений в галтели паза возрастает лишь на 10 ... 30 %.

[4], Как исследования неравномерность распределения показали напряжений в хвостовике типа «ласточкин хвост», вызываемая криволинейным профилем лопатки, значительно меньше, чем в хвостовиках ёлочного типа, а коэффициент влияния формы составляет примерно 1.3. Наличие промежуточной ножки существенно снижает неравномерность распределения напряжений в хвостовиках лопаток компрессоров и турбин.

Таким образом, на основе расчётно-экспериментальных исследований 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.

В галтели паза образуется высокая концентрация контурных напряжений, которая с увеличением угла наклона а контактной грани несколько снижается, однако может достигать $\alpha_{\sigma} = 3$.

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.

4.2. Основы физической модели разрушения деталей в соединениях авиационных двигателей, подверженных действию фреттинга

Механизм фреттинга по характерным признакам относится к наиболее сложным по своей природе процессам. Это связано с тем, что, с одной стороны, он включает физико-химические процессы, протекающие на молекулярном уровне, вследствие чего в зоне реального контакта образуются окислы металлов сопряжённых деталей. С другой стороны, он включает механические процессы разрушения и абразивного износа в зоне контакта в субмикроскопических и макроскопических объёмах поверхностного слоя деталей. Эти процессы тесно связаны между собой, а преобладание того или иного механизма на различных этапах и при разных соотношениях параметров процесса может изменяться и по-разному влиять на сопротивление усталости.

Известные предложения [3,2,24,25,12,32,33] ПО моделям процесса фреттинг-коррозии часто базируются на традиционной зависимости: интенсивность процесса износа, характеризуемая степенью потери массы контактирующих тел, принимается как функция параметров процесса (величины контактных нагрузок, амплитуды перемещений, частоты и т. п.). Влияние параметров, в свою очередь, зависит от механических свойств и природы материалов и поэтому, основываясь на принципах равновесной термодинамики, необходимо дополнительно учитывать физические И химические свойства взаимодействующих материалов. Например, роль взаимодействия химического фактора оценивается ПО результатам неоднородных конструкционных материалов в разных средах, различающихся химической активностью, когда используется ряд активности Вольта. Однако рассмотренные в 1 главе модели, которые созданы, как правило, на основе

методик, применяемых при изучении процессов износа, не позволяют прогнозировать влияние фреттинг-коррозии на сопротивление усталости.

Фреттинг - это процесс, возникающий при циклическом нагружении в образующих зоне контакта деталей. между собой прессовое или малоподвижное соединение. Величина амплитуды относительных перемещений А_р в зоне контакта деталей, достаточная для возникновения процесса, находится в пределах упругих деформаций поверхностного слоя детали. Минимальная амплитуда A_p, при которой наблюдается процесс, не может превышать 100 нм, а при 200...300 мкм и более доминирующим становится процесс фреттинг-износа. В то же время степень повреждения поверхностного слоя в зависимости от величины неоднозначна, так как она определяется не только величиной давления в зоне контакта р, но и свойствами материала контактирующих деталей.

На рис. 4.2 приведена одна из возможных схем процесса фреттингкоррозии. В исходном состоянии в зоне контакта сопряжённых деталей (рис. 4.2а) всегда происходит локальный контакт (на рис. 4.2а полу эллипсами контактного влияния на материал). площадь которого указаны ЗОНЫ определяется видом и качеством обработки поверхности. При воздействии на малоподвижное соединение эксплуатационных нормальных Ν И тангенциальных F нагрузок сопряжённые поверхности смещаются (рис. 4.2 б) с амплитудой ± A_p; при этом у границ контакта образуются частицы материала повреждённых поверхностей и возможно образование суб- и микротрещин.

Далее эти процессы циклически повторяются (см. рис. 4.2 в и г), однако при этом:

 — резко увеличивается количество продуктов повреждения (их значение уже было рассмотрено);

— меняются участки активного контакта и зон влияния, а прямой контакт сопряжённых деталей может переходить в контакт через продукты повреждения (износа), как показано на рис. 4.2 в и г; в зонах циклического контакта (уже было рассмотрено) постоянно возникают условия для образования и развития суб- и микротрещины (рис. 4.26-г) или абразивного износа, способствующего удалению микротрещин (рис. 4.2 г).

Таким образом, 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.



Рис. 4.2. Схема процесса фреттинг-коррозии:

 а) малоподвижное соединение под воздействием начального давления Np; б)... г) зоны контакта после относительных смещений сопряжённых поверхностей под действием знакопеременной тангенциальной силы Fp

На рис. 4.3 приведены типичные примеры повреждений поверхности контакта и образования усталостных трещин при фреттинге. Поверхностные трещины, образующиеся у границы постоянного контакта под действием знакопеременных касательных напряжений, показаны на рис. 4.3 а. Здесь фактор износа, связанный с абразивным воздействием продуктов повреждения на поверхности сопряжённых деталей, может играть «залечивающую» роль при больших амплитудах А_р.

В зоне, находящейся номинально в контакте (рис. 4.3 б), но там, где фактически имеется зазор между сопряжёнными деталями, не удаляемые окислы способствуют сначала образованию каверн. Затем в поверхностном слое каверны под воздействием продуктов повреждения, способствующих росту локального давления, может изменяться структурное состояние материала и образовываться упрочнённый (светлый) слой с повышенной твёрдостью и сопротивлением образованию усталостных трещин.



Рис. 4.3. Характерные образования усталостных трещин и повреждений при фреттинге в зоне контакта:

 а) вызванные воздействием продуктов повреждения (окислами и др.) износ и образование каверны, вокруг которой сформировался упрочнённый (светлый) слой с изменённой структурой и повышенной твёрдостью; бб) поверхностные трещины у границы постоянного контакта;
 в) поверхностные и подповерхностные трещины усталости, возникающие в зоне постоянного контакта под действием нормальных и касательных напряжений.

Когда твёрдость продуктов повреждения (окислы) выше, чем основного материала, они (при удалении их из зоны номинального контакта) выполняют функцию абразива, а процесс переходит во фреттинг-износ, который способствует удалению из зоны первоначально образовавшихся поверхностных усталостных трещин. При твёрдости окислов ниже, чем у материала, продукты повреждения, попадая в зону контакта, могут выполнять роль твёрдой смазки.

В зоне постоянного контакта (рис. 4.3 в) под действием циклически изменяющихся нормальных и касательных напряжений образуются усталостные трещины: поверхностные у границы и подповерхностные в центре контакта. Роль фреттинг-износа для этой зоны, находящейся номинально в контакте, минимальна.

На рис. 4.4 приведена схема физической модели, поясняющая механизм образования в зоне контакта усталостных макротрещин и повреждений при

фреттинге и фреттинг-усталости в малоподвижных соединениях, представленных на рис. 4.2и 4.3.



Рис. 4.4. Схема физической модели процесса фреттинга и размещения зон с типичными повреждениями в виде образования каверн.
 а)-поверхностные каверны; (б) –подповерхностные трещины;

(в) -поверхностные усталостные трещины

В отличие от традиционного процесса износа, когда сопряжённые детали имеют однонаправленное перемещение, однозначной корреляции при фреттинг между механическими свойствами материалов, например по параметру твердости, и процессом фреттинг-износа или сопротивлением фреттингусталости обнаружить не удаётся. В частности, как далее будет показано, при одних и тех же параметрах процесса фреттинга (величине амплитуды относительных перемещений сопряжённых поверхностей величине давления в зоне контакта, коэффициента трения и др.) повреждаемость поверхности контакта может существенно различаться. Например, для нержавеющей стали 13Х11H2BMФ, отпущенной на твёрдость HB = 2800 МПа, при фреттинге ярко проявляются признаки износа (интенсивного образования окислов, каверн, изменения массы и т.д.). Тем не менее, эти признаки повреждения поверхности контакта оказывают существенно меньшее влияние на снижение предела выносливости, чем последствия процесса схватывания, которые не обнаруживаются у этой стали после отпуска на твёрдость HB≥ 3100 МПа и проявляются в виде отдельных незначительных локальных повреждений поверхности.

В первом случае процессы абразивного износа сопровождаются удалением слоев с большей части зоны контакта, где возникли усталостные микротрещины. Во втором случае, когда отсутствует абразивный износ, ведущими оказываются локальные процессы схватывания материалов, а в зоне контакта возникают благоприятные условия для образования и развития усталостных микротрещин.

С точки зрения химической активности анализ результатов изучения поведения материалов в искусственно создаваемых условиях окисления и электрохимической коррозии показал, что на разных стадиях фреттинга может И характер коррозионных процессов. На начальной меняться стадии преобладают процессы газовой коррозии-окисления, связанные с высокой энергетической свободных активностью ювенильных частиц, освобождающихся от окисной плёнки с поверхности материалов в зоне контакта. При избытке кислорода происходит пассивация поверхности. На следующей стадии ведущими становятся электрохимические процессы, связанные с усилением коррозии из-за катодного деполяризатора (кислорода).

Электрохимическая коррозия возникает не только в контакте, где могут образовываться микро- и макро гальванические пары. Показано, что более благородные металлы (серебро, олово) в контакте со сталью подвергаются фреттинг-коррозии меньше, чем сталь со сталью. Материалы (цинк, кадмий),
имеющие по отношению к стали более отрицательный потенциал, интенсивно разрушаются, защищая сталь от разрушения.

Электронно-микроскопические и металлофизические исследования показывают, что тонкие поверхностные слои в зоне фактического контакта находятся в высокодисперсном состоянии, включающем как ювенильные частицы материала контактирующих пар, так и их окислы. При этом по составу и свойствам окислы в зоне контакта под воздействием циклических нагрузок существенно отличаются от окислов, образующихся в стационарных условиях. Например, в процессе испытаний на фреттинг-коррозию титановых сплавов зоне контакта зафиксировать автору не удавалось В повышение электросопротивления, что обычно наблюдается у других материалов на самых ранних стадиях процесса фреттинга. Однако измеренная в стационарных условиях (после испытаний) величина электросопротивления в зоне контакта этой пары составила нескольких килоомов. На поверхности образцов из титановых сплавов, повреждённых фреттингом, наблюдались не механические повреждения поверхности абразивом, а следы от воздействия вязкой аморфной среды окислов. Поэтому результаты исследования физических свойств и химический состав продуктов фреттинга на повреждённых поверхностях контакта могут быть не объективными. Это объясняется тем, что они могут являться следствием процесса, а не реально действующими при фреттинге факторами.[11]

К основным параметрам, определяющим интенсивность процесса фреттинга, относятся:

- амплитуда относительных перемещений A_p;

- давление в зоне контакта р;

- частота колебаний при относительных перемещениях v;

- число циклов нагружения (перемещения) N^{фp};

природа материалов (химическая активность, сплав образующий элемент, механические свойства и др.);

- окружающая среда.

Анализ методик, использованных для исследования процесса фреттинга, свидетельствует о том, что ряд из них некорректен, а следовательно, полученные результаты необъективны. Это связано с тем, что во многих случаях параметр процесса оценивались косвенно или по номинально задаваемым значениям амплитуд (давлений и др.).

фреттинга Рассматривая процесс С точки зрения механики взаимодействия твёрдых тел, можно отнести участки локального контакта к одному из видов контакта двух тел (контакта полусфер или полуцилиндров между собой и т.п.) при наличии циклически изменяющегося НДС, связанного с нормальной и касательными силами. Следовательно, возникающее в зонах локального контакта сложное напряжённое состояние является результатом одновременного действия нескольких силовых составляющих: от нормальных к поверхности напряжений сжатия, вызываемых, например, прессовой посадкой, касательных напряжений, вызываемых силами трения, от знакопеременных растяжения-сжатия, изгиба, кручения или их сочетания.

Таким образом, элементарный объём материала в зоне реального контакта находится в условиях трёхосного напряжённого состояния, подвергаясь циклическому деформированию под действием нормальных и касательных сил, имеющих градиент по глубине и поверхности зоны контакта. При реальном дискретном контакте в зависимости от амплитуды эквивалентных напряжений при соответствующем числе циклов нагружения на поверхности контакта могут возникать статические, квазистатические, малоцикловые и усталостные микрои макро разрушения. В сочетании с рассмотренными физико-химическими взаимодействиями материалов эти процессы могут интенсифицироваться или тормозиться, являясь постоянным источником свободных микрочастиц, разрушения микрообъёмов материала и образования суб- и микротрещин, которые под действием локальных нагрузок формируют условия для развития макротрещин от основных эксплуатационных нагрузок, т.е. выполняют функцию начальных концентраторов напряжений.

Оксиды	Температура	Твёрдость	Температура	Твёрдость
	плавления	окисла	плавления	металла
	окисла, °С	(по Моссу)	металла, °С	(по Моссу)
Fe ₂ O ₃	1505	6.5	1535	4-5
Fe ₃ O ₄	1538	6.5	1535	4-5
NiO	2090	5.5	1455	-
A1 ₂ O ₃	2050	9	660	2
SnO	1127	6-7	232	1.8
ZnO	1670	4.5	410	(1.2)
PbO	888	2	327	1.5
CdO	1426	3	321	2
Cu ₂ O	1235	-	3083	2.5-3
CuO	1026	3-4	1083	2.5-3

Твёрдость и температура плавления окислов некоторых металлов (по данным [20])

Как уже было отмечено, значительную роль в процессе фреттинга играют разрушения контактирующих поверхностей, окислы которых имеют существенно большую твёрдость, чем материалы сопряжённых пар. Этот факт хорошо иллюстрируется данными табл. 4.1.

Сравнивая по твёрдости металлы и их окислы, можно заметить, что окислы Al, Sn выше по твёрдости, а окислы Fe только близки по твёрдости к закалённой стали. При этом твёрдость Al₂O₃, находясь на одном уровне со сверхтвёрдыми сплавами, более чем на 10% превышает твёрдость азотированной стали.

Приведённые данные позволяют сделать вывод о значительной роли окислов в механизме фреттинг-износа и фреттинг-усталости. Если принять во внимание, что в общем случае удельный вес окислов меньше, чем основного материала, а объём, занимаемый ими увеличивается, то становится понятной их доля, вносимая в повышение удельного давления в зоне.

4.3.Параметры кривых усталости и обобщенные кривые усталости замковых соединений

На кривой усталости (рис. 4.5), обобщающей результаты испытаний замковых соединений из стали 13Х11Н2В2МФ, можно выделить три участка. На первом $\sigma_a = 350 - 300$ МПа — с показателем m_1 близким к нулю, т. е. со снижением σ_{α} , долговечность практически не изменяется и даже уменьшается.



Рис. 4.5. Обобщенная кривая усталости замковых соединений из стали 13Х11H2B2M Φ ($T_{исп} = 20^{\circ}$ С, $\sigma_{см} = 260$ МПа)

Это объясняется преобладающим влиянием на процесс фреттинга абразивного износа, который сопровождается эффектом "самозалечивания" повреждений. Второй ($\sigma_a = 350 - 185$ МПа) и третий ($\sigma_a < 185$ МПа) $\sigma_{cM}^p = 260$ МПа участки кривой с показателями наклона $m_2 = 3,4$ и $m_3 = 12$ являются типичными для кривых усталости при обычной многоцикловой усталости, а точка перелома кривых соответствует долговечности $N_0 = 2.10^6$ циклов.

Принимая во внимание данные, полученные при амплитуде напряжений $\sigma_{\alpha} = 150$ МПа, можно считать, что фактическое значение m₃ для этого участка кривой будет несколько выше. Однако сделанное допущение идет в запас прочности, а ощутимые погрешности (около 20 %) при прогнозировании предела выносливости будут возможны при долговечностях, превышающих 10⁹ циклов.

4.4. Прочность замковых соединений при циклическом нагружении



Рис. 4.6. Кривые малоцикловой усталости замковых соединений (1,2,3 - Т_{исп} =20°С; 1', 2', 3' - Т_{исп} = 450°С) 1 и 1'- покрытие ВАП; 2 и 2'- покрытие серебром; 3 и 3' - ультразвуковое упрочнение, покрытие ВАПЗ Увеличение ресурса двигателей до 10·10³...50·10³ч. сопровождается ростом числа циклов нагружения лопаток в процессе эксплуатации. Поэтому

при стендовых циклических испытаниях выявляют слабые места конструкции и определяют параметры основных процессов механизма разрушения, ответственных за несущую способность этого узла, в частности сопротивление малоцикловой усталости замковых соединений.

Были исследованы замковые соединения из сплава ВТ8 при циклическом нагружении при нулевом цикле растяжения. Испытания проводились после наработки N более 5·10⁷ циклов, при температуре $T_{ucn} = 20...450^{\circ}$ C, при частоте 0,1Гц. Так как при эксплуатации ГТД интенсивность процесса повреждения замковых соединений от малоцикловой или много цикловой усталости на различных режимах может чередоваться, часть соединений перед испытаниями на малоцикловую усталость, была предварительно испытана на усталость в условиях симметричного изгиба при одновременном воздействии осевой статической составляющей. Повышенные вибрационные нагрузки OT резонансных или срывных и т.п. колебаний лопаток чаще наблюдаются на переходных частотах вращения ротора. Вызванные ими повреждения в замковом соединении могут затем либо получить развитие на других режимах, либо законсервироваться до повторного выхода на эти режимы.

Полученные результаты показывают, что минимальная долговечность при нормальной температуре характерна для замковых соединений без защитных покрытий или покрытых ВАП. Покрытие серебром увеличивает долговечность в 1,5 ÷ 2 раза. Преимущество покрытия серебром по сравнению с покрытием ВАП может быть основано на том, что покрытие серебром обладает более низким коэффициентом трения. Вследствие этого увеличиваются амплитуды относительных перемещений между хвостовиком лопатки диском, И интенсифицируются абразивного процессы износа В зоне контакта, залечивающие повреждения от фреттинга. Аналогичные явления наблюдаются и при испытаниях замковых соединений на многоцикловую усталость.

При напряжениях испытания (при $\sigma_{\Sigma max}$ менее 600 МПа), долговечность N составит более 2·10³ циклов. Эффективность поверхностного упрочнения ультразвуком сохраняется при $T_{исп.} = 450^{\circ}$ С.

Влияние на сопротивление малоцикловой усталости при повышенных температурах в диапазоне долговечности до 10^4 циклов проявляется в резком снижении $\sigma_{\Sigma max}$ (до 40% при $T_{\mu cn} = 450$ °C). Для хвостовиков, упрочненных ультразвуком (УЗУ), отмечается снижение прочности при $T_{\mu cn} = 300$ °C, что вызвано процессами разупрочнения пластически деформированного слоя. Однако при $\sigma_{\Sigma max} = 600$ МПа и долговечности > 10^3 циклов в исследованном диапазоне долговечность упрочненных хвостовиков увеличивается. При температуре $T_{\mu cn} = 450$ °C минимальная долговечность отмечена при напряжениях менее 700 МПа у замковых соединений, покрытых серебром.

Выдержки при $\sigma_{\Sigma max}$ в течение 300...600 с сопровождаются снижением сопротивления малоцикловой усталости при долговечностях до 10³ циклов. Максимальное снижение прочности (около 10%) отмечается при нормальной температуре для хвостовиков, упрочненных УЗУ, по сравнению с 5% снижением прочности при температуре 450°С. Длительность выдержки при $\sigma_{\Sigma max}$ не оказывали влияния на прочность хвостовиков, покрытых серебром, а влияние на долговечность длительности выдержек в 300 или 600°С не обнаружено для всех исследованных вариантов.

Предварительное испытание на многоцикловую усталость замковых соединений оказало наибольшее влияние на циклическую долговечность упрочненных хвостовиков. Их долговечность в результате повреждения контактной площадки фреттинг-коррозией уменьшалась при $\sigma_{\Sigma max} < 900$ МПа примерно в 1,5 ... 2 раза.

Полученные результаты подтверждают отсутствие справедливости в механизме повреждения фреттинг-коррозией титановых сплавов принципа суперпозиции.

Обобщенная кривая малоцикловой усталости приведена на рис.4.6. Анализируя разрушения замковых соединений при МЦУ, можно выделить три слабых звена, определяющих несущую способность соединения:

 выступ диска в зоне концентрации напряжений - радиус перехода от контактной грани ко дну паза;

 – хвостовик в зоне интенсивного повреждения фреттинг-коррозией площадки контакта с выступом диска;

— хвостовик в зоне концентрации напряжений у радиуса перехода от ножки к хвостовику.



Рис. 4.7. Обобщенная кривая малоцикловой усталости замковых соединений △ - разрушение по контактной грани лопатки; □ - разрушение выступа диска;

• - разрушение по ножке лопатки; о - среднее значение долговечности

Можно также указать условия, при которых происходит разрушение по одному из этих звеньев. Разрушение выступа диска (теоретический

коэффициент концентрации напряжений $\alpha_{\sigma} = 3,0$) происходило только при нормальной температуре в широком диапазоне напряжений $\sigma_{\Sigma max} = 900 \dots 600$ МПа при долговечности N равной $10^3 \dots 10^4$ циклов и в случаях, когда площадки контакта хвостовиков имели покрытия или подвергались упрочнению. В изломах выступов диска отмечались фрактографические признаки, характерные для МЦУ.

Для всех вариантов замковых соединений, преобладающими, были разрушения по контактным граням хвостовиков ($K_{\sigma}^{\phi p} \ge 3,5$). Они наблюдались в широком диапазоне $\sigma_{\Sigma max}$ при долговечности N $\ge 5 \cdot 10^2$ циклов. Разрушение начиналось от поврежденной фреттинг-коррозией поверхности, основная трещина усталости распространялась от действия касательных напряжений по нормали к поверхности контакта, а затем по траектории действия главных максимальных напряжений. При долговечности около 10^4 циклов одновременно наблюдались оба вида разрушений (см. рис. 4.6).

Третий вид - разрушение по радиусу перехода от ножки к хвостовику (α_{σ} =1,5 ... 2,0) возникало при N > 5·10² циклов и чаще при повышенных температурах. При однократном нагружении срезались площадки контакта.

Таким образом, кривую малоцикловой усталости для замкового соединения (см. рис. 4.6) можно рассматривать как кривую равной вероятности разрушения узла по слабым звеньям: уменьшение вероятности разрушения от фреттинг-усталости повышает вероятность разрушения межпазового выступа или ножки, но долговечность соединения в целом не увеличивается.

Следовательно, технологические и конструкторские мероприятия, направленные на повышение несущей способности замкового соединения и надежности конструкции, должны учитывать все слабые звенья узла: геометрические (концентраторы напряжений) и эксплуатационные - от повреждения фреттинг-коррозией.

4.4.1.Конструктивно – технологические методы повышения несущей способности замковых соединений

Для замковых соединений типа "ласточкин хвост" чаще встречаются хвостовики с углами α ≥ 60°. При α < 60° возникает необходимость усиления ободной части диска и хвостовика для снижения α_σ. В этом случае единственным видом сопряжения хвостовика с выступом диска является "жесткое врезание". Наиболее неблагоприятный вид сопряжения хвостовика с диском "податливое врезание" чаще всего наблюдается при а α > 60°. Предпочтение следует отдавать конструкции, где реализуется нависание достаточно жесткого выступа диска. Когда возникает необходимость в выборе конструкции минимальными запасами прочности переменным С ПО напряжениям, основным способом повышения сопротивления усталости является применение поверхностного пластического упрочнения контактных плоскостей и зон концентрации напряжений.

Эффективность применения защитных антифрикционных покрытий зависит от правильности подготовки поверхностей перед нанесением покрытия. Преимущества покрытия из Ag по сравнению с Ni-Cd или ВАП не обнаружено при повышенных температурах (450 ... 600°C). Поверхностное упрочнение хвостовиков лопаток позволяет значительно повысить предел выносливости замковых соединений как при нормальной, так и при повышенных температурах. Но при повышенных температурах и больших ресурсах может иметь место разупрочнение пластически деформированного поверхностного слоя, что сопровождается снижением сопротивления усталости. В связи с тем, что замковое соединение имеет несколько слабых звеньев (геометрические концентраторы напряжений, наличие поверхностей контакта, подверженные фреттинга), а влияние их на многоцикловую и малоцикловую усталость одинаково, то при разработке мероприятий по повышению пределов выносливости необходимо учитывать это обстоятельство.

4.5. Фреттинг-усталость конструкционных материалов, применяемых в компрессорах ГТД и ЭУ

Рассмотрим некоторые результаты испытаний на фреттинг-усталость конструкционных материалов, применяемых в компрессорах ГТД, где наиболее часто встречаются разрушения от фреттинг-усталости.

В работе проводились сравнивнения различных видов обработок, включая упрочняющие, защитных покрытий *Ag*, *Ni-Cd*, ДиФ-СД, ВАП и *WC*. Такие испытания очень полезны на первом этапе выбора материалов для сопряжённых пар, а также защитных покрытий от фреттинга, дающие близкие результаты, например, с результатами испытаний замковых соединений лопаток компрессора.

В табл.4.2 приводятся результаты испытаний на фреттинг-усталость образцов с накладкам, имитирующих малоподвижное соединение, например лопаток компрессора (рис.4.8).





Рис.4.8. Схема испытаний на фреттингусталость при «жёстком» нагружении симметричным изгибом: *1*- плоский образец; *2*- накладки;

3- прокладки;4- тензорезисторы

Рис.4.9. Эпюра распределения контактных напряжений при линейном контакте цилиндра с плоскостью, полученная методом МКЭ и реализуемая при схеме испытаний на рис.4.8

Можно отметить (табл.4.2), что значения коэффициента снижения фреттинг-усталости сопротивления для поверхностей, обработанных шлифование и фрезерованием достаточно высокие особенно для титанового сплава BT8, который составляет $K^{o\phi}_{p} = 3.75$ для исходного состояния (фрезерование +шлифование), для стали 13Х11Н2В2МФ (отпуск 580°С; шлифование) значение $K^{o\phi}_{p} = 2.78$, а для стали 15Х16К5Н2МВФАБ (отпуск 650° С; шлифование+пескоструйная обработка) значение составило $K^{\phi p}_{\sigma} = 3.85$. Между тем, наибольший положительный и практически одинаковой эффект для пары стали 13X11H2B2MФ – сталь показали упрочнение обкаткой роликом, а также упрочнение в сочетание с покрытиями Ag, Ni-Cd и ВАП-2. Разница между ними минимальна: по пределам фреттинг-выносливости составляет около 5%.

B отличие от коррозионных повреждений, где было отмечено превосходство стали 15Х16К5Н2МВФАБ (отпуск 650°С) над сталью 13Х11Н2В2МФ, но в случае фретинг-усталости при наличии шлифования с $K_{\sigma}^{\phi p}$ пескоструйной обдувки величина последующей V стали 15Х16К5Н2МВФАБ возросла до 3,85 по сравнению с $K_{\sigma}^{\phi p} = 2.78$ для стали 13Х11Н2В2МФ после шлифования. Превосходство стали 13Х11Н2В2МФ по сопротивлению фреттинг-усталости сохранилось и после нанесения покрытие Ni-Cd.

Обращает на себя высокая чувствительность к фреттинг-усталости титанового сплава ВТ8, у которого значение $K_0^{\phi p}$ составляют 3.75, но при наличии упрочнения микро шариками с последующим детонационным напылением (ДН) площадки контакта карбидом вольфрама WC значение $K_0^{\phi p}$ снижается до 2.2. Наибольший эффект от применения защитных покрытий наблюдается у стали 13X11H2B2MФ (отпуск 580⁰C), где получено минимальное значение $K_0^{\phi p}$ =1.52, в то время как для ВТ8 минимальное значение $K_0^{\phi p}$ составило 2.25.

Большое различие в исходных значениях степени повреждаемости

Фрутингом и в эффективности применения защитных покрытий для сталей связано с методом обработки исходной поверхности перед нанесением покрытий (рис.4.10).

Таблица 4.2

Значения пределов фреттинг-усталости $\sigma^{\phi p}_{-1}$ и значений эффективных коэффициентов концентрации напряжений $K_0^{\phi p}$. для образцов из конструкционных материалов различными методами обработки поверхности в зоне контакта, испытанных при «жестком» нагружения (рис.15),. Симметричный изгиб, $N=2\ 10^7$ циклов, $T_{\mu n}=20^0$ C

№ п/п	Методы обработки поверхности в зоне контакта	Предел выносливости σ ^{фр} -1, МПа	K _o ^{фp}	Примечание
1	Шлифование	180	2.78	
2	П.1 + покрытие Ag	260	1.92	Образец и накладка из
3	П.1 + покрытие Ni-Cd	225	2.22	стали 13X11H2B2MФ
4	П.1 + Дефо-СФ	170	3.24	(отпуск 580 ⁰ С);
5	П.1 + упрочнение роликом	320	1.56	давление <i>p</i> = 450 МПа.
6	$\Pi.5$ + покрытие Ag	310	1.61	Исходная величина для
7	П.5 + покрытие <i>Ni-Cd</i>	330	1.52	стали σ ₋₁ =550 МПа
8	П.5 + покрытие ВАП-2	- 550	1.52	
9	Шлифование + пескоструйная обдувка	130	3.85	Образец и накладки из
10	П.9 + покрытие <i>Ni-Cd</i>	190	2.79	стали
11	П.9 + покрытие Ni-Tic	180	2.78	$15X16K5H2MB\PhiAb$
12	П.9 + покрытие <i>Ni-Tic-Cd</i>	170	3.94	(0111yck 050 C);
13	Шлифование + упрочнение микро шариками	210	2.38	Исходная величина для
14	П.13 + покрытие <i>Ni-Tic</i>	200	2.5	$\sigma_1 = 500 \text{ MHz}$
15	П. 14 + виброшлифование	200	2.5	0-1 500 Milla
16	Фрезерование	120	3 75	Образец и накладка из
17	П.16 + шлифование	120	5.75	сплава ВТ8;
18	П.16 + пневмодинамическое	170		давление <i>p</i> = 300 МПа.
10	упрочнение (ПДУ)	170		Исходная величина для
19	П.17 + ПДУ	170	2.65	сплаваВТ8 _{б-1} =450 МПа.
20	П.18 + пескоструйная обдувка (ПСО)	170		Заключительная операция: детонационное напыление

21	П.19 + ПСО	170		WC площадки контакта
$\gamma\gamma$	П.16 + упрочнение			
	микрошариками (УПМ)	200	2.25	
23	П.17 + УПМ			

Образцы из стали 13Х11Н2В2МФ шлифовались, а затем упрочнялись обкаткой роликом. Образцы из стали 15Х16К5Н2МВФАБ шлифовались, а затем подвергались пескоструйной обдувке, степень наклёпа от которой была значительно меньшей, чем при обкатке.

Из рис.4.10*б* видно, что после интенсивного поверхностного упрочнения обкаткой роль влияния исследованных покрытий невилируется. Полученный результат показывает, что формальный перенос данных даже для одного и того же материала без знания особенностей технологического процесса изготовления деталей (включая режимы применяемых термообработок), а таже условий испытаний повышается вероятность риска при принятии решений о выборе оптимальных вариантов.



Рис. 4.10. Кривые фреттинг-усталости плоских образцов из стали 13Х12H2BMФ (отп.580⁰C) при «жёстком» нагружении ($T_{исп}=20^{0}$ C, p=300 МПа). Цифры у значков – число испытанных образцов на этой базе N (значки со стрелкой - неразрушенные; без стрелки – разрушены): а) исходная поверхность - шлифование, $R_{a}=1.63$ мкм : 1 -0- исходная; 2- × – покрытие Ni - Cd; - Δ - покрытие Ni-Cd;

3 - ●- покрытие *Ag*; 4 - ▼ – покрытие *Ni* – *Cd* + ВАП

- ▲ - покрытие Аg;

- ▼ - покрытие *Ni*- *Cd* + ВАП

Таблица 4.3

Результаты испытаний на фреттинг-усталость по схеме вал втулка при «мягком» нагружении. Симметричный изгиб $N = 2 \cdot 10^{-7}$ циклов, $T_{\text{исп}} = 20^{-0}$ С

Материал		Давление в	Предел	
Образец	Накладка	контакте	выносливости	$K^{\mathrm{dp}}_{}\sigma}$
		<i>р</i> , МПа	$\sigma^{\varphi p}$ -1, MПa	
	-	-	100	1.0
Сплав		5	72.5	1.37
АК4-1	АК4-1	50	62	1.61
		100	78	1.28
	-	-	550	-
сталь	13Х11Н2В2МФ	10-	310	1.79
13X11H2B2MФ	отпуск 580 ⁰ С	100	260	2.21
отпуск		200	280	1.96
580 ⁰ C	СплавАК4-1	100	290	1.89
	Сплав	10	330	1.67
	BT3-1	100	300	1.82
	-	-	360	1.0
		10	200	1.78
	Сплав ВТ3-1	100	110	3.22
Сплав ВТ8		200	110	3.22
	13Х11Н2В2МФ	10	170	2.12
	отпуск 580 ⁰ С	100	105	3.45
		200	200	1.76

Можно отметить, что при «мягком» нагружении (см. табл.4.3) наблюдается тенденция повышения значений $K_{\sigma}^{\phi p}$ с ростом давления в зоне контакта, однако при этом существует некоторое критическое значение p, при котором K_{σ}^{ρ} стигает максимальной величины. Кроме того, величина $K_{\sigma}^{\phi p}$ может

изменяться в зависимости от материалов контактирующих пар и функции, которую выполняют детали. Например, для пары стальной вал и титановая втулка величина $K_{\sigma}^{\phi p}$ меньше, чем $K_{\sigma}^{\phi p}$ для титанового вала со стальной втулкой. Это позволяет сделать вывод, что при «мягком» нагружении в паре «вал-втулка» наиболее повреждаемой деталью при фреттинг - усталости является вал.

Наибольшие значения $K_{\sigma}^{\phi p}$ как при «жёстком» нагружении, так и при «мягком» характерны для пары «титан-титан», величины которых в первом случае достигают в исходном состоянии 3.75...2.25, а при «мягком» значения $K_{\sigma}^{\phi p} = 3,22...1.78$.

Для пары «сталь-сталь»для «жёстком» нагружении значения $K_{\sigma}^{\phi p}$ находятся в диапазонах 3.85...2.25 (сталь 15Х16К5Н2МВФАБ), а для стали 13Х11Н2В2МФ при «жёстком» нагружения значения снижаются до $K_{\sigma}^{\phi p}$ =3.24...1.52, а при «мягком» -до $K_{\sigma}^{\phi p}$ =2.21...1.79.

Таблица 4.4

Сведения	0	влиянии	технологических	процессов	восстановления	вала	винта	(сталь
40XHMA)	, п	овреждаем	юго фреттинг-кор	розией при	наработке в тече	ние 15	500300	00ч., и
влиянии те	ехн	ологическ	хих процессов на со	опротивлени	ія МнЦУ			

NºNº	Исследованный вариант	Значен	ия преде	лов		$\beta_{\Pi} = \sigma_{-1}$	^{покр} /о-1
п/п	технологического процесса	выносл	ивости о	5 -1, МПа	S_{lgN} ,	для N, циклов	
		для <i>N</i> ,	для <i>N</i> , циклов				
		$2 \cdot 10^{7}$	$5 \cdot 10^{7}$	10 ⁸	а	$2 \cdot 10^{7}$	10^{8}
1	Шлифование	515	510	500	1,2	1	1
2	Шлифование+хромирование +						
	шлифование+полирование	305	290	280	1,05	0,59	0,56
3	Шлифование+отпуск 520 ⁰ C +						
	обдувка электрокорундом	490	470	450	1.0	0,96	0,9
4	П.1+обдувка электрокорундом						
	+хромирование+шлифование						
	+полирование	420	400	380	1,15	0,82	0,76
5	П.1+обдувка эл.корундом						

+хромирование+шлифование						
+отпуск 520 ⁰ С+ полирование	415	400	390	1,15	0,79	0,78

Примечание: вариант 2 – серийная технология, для ресурса 1500...3000ч

В табл.4.4 приведены сведения об исследовании влиянии технологических процессов восстановления на сопротивление усталости вала винта, повреждаемого в эксплуатации фреттинг-коррозией. Показано, что наибольшая величина предела выносливости σ₋₁ =500МПа достигается после шлифования, но при этом наблюдается повреждение в эксплуатации поверхностей контакта фреттингом.

Нанесение защитного покрытия хромированием приводит к снижению предела выносливости до 0,56 от исходного значения. После шлифования, отпуска при 520⁰C и обдувки электрокорундом опасного сечения предел выносливости снижается лишь на 10%.

Наибольшую величину предела выносливости 0,78σ₋₁дляN =10⁸ циклов после хромирования удалось получить только после комплексной обработки: шлифование, обдувка электрокорундом, хромирование, шлифование, отпуска при 520⁰С и полирование.

4.6. Современные защитные покрытия от фреттинга деталей и замковых соединений лопаток компрессора

Для деталей компрессора из сталей 15Х16К4Н2МВФАБ, 13Х11Н2В2МФ, ХН45МВТЮБР, эксплуатирующийся при температуре до 600° С во все климатических условиях и подверженных фреттинг-коррозии, разработано ликёрное покрытие ВПМСА на основе алюмохромфосфатного связующего с наполнителем из дисилицида молибдена (*MoS*₂) с фракцией менее 10мкм. На поверхности хвостовиков, повреждаемых фреттингом, окончательно готовых лопаток компрессора, имеющих на профильной части покрытие СДП-1+ВСДП-20(ВП), наносят покрытиеВПМСА шликерным способом. Эту поверхность лопатки или другой детали предварительно подготавливают, а после нанесения покрытия проводятся сушка и термообработка.

В настоящее время для хвостовиков лопаток вентиляторов большинства современных ГТД широко используется технология ASD - атмосферное плазменное напыление покрытия CuNiIn (58,5Cu-36,5Ni-5In), предложенная около 20 лет тому назад фирмой General Elektric США. Основной материала порошка для этого покрытия является сплав из меди и никеля, который известен как подшипниковый материал, обладающий достаточно высокоэффективный низким коэффициентом трения и высокой несущей способностью. Добавка в этот сплав 5% индия, который, благодаря своей способности образовывать на поверхности металла пленки с сопротивлением низким касательным напряжениям, позволил применить это покрытие в качестве твердой смазки. Отметим, что технология ASD покрытий CuNiIn со значительной (до 10%) естественной пористостью, при этом на его поверхность и непосредственно внутрь покрытия можно добавлять суспензию *MoS*₂ являющуюся хорошо известной твердой смазкой типа ВАП, тем самым дополнительно защищая поверхность контакта от фретггинг-износа.

Широко известны покрытия с высоким содержанием Ag. Несмотря на сравнительно невысокую износостойкость, они обладают очень низкой склонностью к схватыванию в контактах. Этигальванические покрытия имеют толщину до 10...15 мкм.

В настоящее время в узлах трения авиационно-космической техники широкое применение нашли покрытия «пленочного» (тонкослойного) типа, получаемые различными методами: натиранием (шаржированием), *ИПО* – ионно-плазменное осаждение, диффузионным насыщением, гальваническим осаждением, *CVD* –химическим осаждением, электрофорезом, *ВПТВЭ* – электронными и плазменными методами осаждения в вакууме.

Используются такжешликерные с органическимисвязующимитолщиной более 50 мкм. Однако такие покрытия, как правило, имеют небольшой ресурс и применяются в узлах трения, в которых длина пути трения незначительна и

практически отсутствует унос продуктов изнашивания.

Для использования в замковых соединениях ГТД с целью увеличения ресурса при фретгинг-износе наиболее известны относительно толстые (до 200...300 мкм) покрытия, основу которых составляют износостойкие матрицы из неорганических материалов. В этих покрытиях основную функциональную нагрузку несет слой, который может быть выполнен как из мономатериала, так и представлять собой матричную композицию из различных компонентов, гарантирующих синергетическое повышение эксплуатационных характеристик.

Такие покрытия содержат пропиточный слой или слой твердой смазки в виде мономатериала без матрицы, являющийся приработочным слоем с низкой прочностью на сдвиг, обеспечивающей быструю приработку покрытия на рабочем режиме.

Состав для получения шликерного покрытия, разработаного ВИАМ, стойкого к фреттинг-коррозии для деталей из сталей, титановых и никелевых сплавов. Состав покрытия (мас.%): алюмофосфатное связующее – 30...35, вода – 12...18, хромовый ангидрид – 2...3и *MoS*₂ –в видепорошкас фракцией ~ 1 мкм. Покрытие может использоваться до рабочей температуры 600°С.

С учетом современных требований для предотвращения разрушения от фреттинг-усталости в замковом соединении широкохордной пустотелой рабочей лопатки вентилятора приотносительно низком уровне рабочей температуры предлагается шликерное покрытие на основе *Al*- бронзы, наносимое методом высокоскоростного напыления (*HVOF*).

В научно-исследовательской лаборатории ВС США, университета Дайтона и компании *Boeing* проведена оценка фреттинг-усталости пяти систем покрытий и обработок поверхности сплава *Ti-6AI-4V* (два вида алмазоподобных углеродных покрытий, плазмонапыленного молибденового, электролизного*Ni-В* и плазм азотированной поверхности) на двух разных установках. Рассматривались два вида обработок поверхности - *LSP* (*lowplasticityburnising*). Наилучшие результаты были у алмазоподобных углеродных покрытий.

В патенте US 6267558 описан способ защиты в компрессорах высокого давления от фреттинга хвостовиков лопаток и диска, включающий нанесения на поверхности сопряжения деталей покрытие из Al бронзы толщиной ~ 8...13 мкм. Сравнение эффективности покрытия делалось с известным покрытием Cu-Ni-In.

В US 5682596 рассмотрено покрытие, состоящее из внутреннего слоя из никелевого сплава, нанесенного способом *HVOF*, и внешнего, состоящего из графитовых частиц в неорганическом связующем (например, силикаты или фосфаты алюминия). Рабочие температуры такого покрытия до 550⁰C.

плазменного покрытия*Ni*[*Cg*] формируется Слой при плазменном напылении порошка графита плакированного никелем. Графит, также как *MoS*₂, имеет явно выраженную слоисто-решетчатую структуру. Атомы угле-рода в кристаллической решетке [Cg], в соответствии с рис. 18 расположены в параллельных слоях, отстоящих один от другого на 0,34нм. В то время как в каждом слое они размещаются в вершинах правильных шестиугольников с длиной стороны 0,14нм. Естественно, что при этом связи между атомами в слоях значительно прочнее, чем между слоями. Поэтому при большом сопротивлении [Cg] сжатию перпендикулярно слоям, сопротивление срезу параллельно слоям оказывается существенно меньшим. Однако исследования действия графита, смазочного проведенные В различных условиях эксплуатации (в вакууме, в сухом и влажном азоте и воздухе, при низких и высоких температурах), не объясняются только слоистой структурой.

Большинство исследователей отмечают, что необходимым условием для проявления графитом его смазывающего действия является наличие между слоями покрытия влаги или окисных пленок. Связано это с тем, что [Cg] и графитовые материалы имеют малую химическую активность, стойки к воздействию большинства кислот и щелочей, растворов солей и органических растворителей. В тоже время [Cg] обладает высокой адсорбционной способностью. При этом адсорбируемые вещества (пары воды, кислород,

углеводороды, пары органических и неорганических веществ) могут внедряться в межплоскостные пространства [Cg], и, увеличивая расстояние между плоскостями, снижать тем самым поверхностную энергию между ними. Для проявления антифрикционной способности [Cg] необходима ориентация базисных плоскостей его частиц параллельно направлению поверхности скольжения. При ориентации частиц перпендикулярно или под наклоном к поверхности [Cg] может внедряться в поверхность контртела, проявляя тем самым абразивное действие.

Покрытие CuNiIn твердосмазочный композиционный материал, который образует граничный слой с необходимыми свойствами по сопротивлению сжатию и сдвигу, но не имеющему строго ориентированной структуры. Это покрытие обладает достаточной прочностью сопротивления продавливанию и предохраняет трущиеся поверхности от прямого контакта и взаимного внедрения. Поскольку сопротивление срезу у этого материала невелико, а площадь фактического контакта трениямала, благодаря твердой подложке, то сопротивление трения при относительном перемещении контактирующих поверхностей также мало. Присутствие In в этом материале обеспечивает в процессе трения образование поверхностных пленок с низким сопротивлением сдвигу. Следует отметить, что в качестве смазочных материалов для подобных пленок можно использовать только те металлы, которые не наклепываются в пределах рабочих температур и не образуют хрупких твердых растворов с металлами сопряженных тел. Температура рекристаллизации In как олова и свинца ниже 20°С, поэтому при пластической деформации эти металлы не наклепываются и со многими металлами не образует хрупких соединений.

Из анализа результатов исследований структуры и химического состава ТСП, проведенных на фирме *СНЕКМА*[33], в многослойном покрытии выявлены пористость и четко выраженные границы, как между каждым слоем, так и между отдельными частицами, при этом структура каждого слоя имеет свои особенности. На основе полученных результатов сделаны следующие выводы:

— слойNiAl — границы между отдельными частицами размыты, преобладают трещины и поры параллельные поверхности подложки, характерные размеры выступов над поверхностью слоя с R = 5...20 мкм;

— слой *NiCuIn* – границы между отдельными частицами проявляются более четко, а трещины и поры имеют сложную форму, напоминающую границы застывающих частиц, характерные размеры выступов над поверхностью слоя с R = 2...35 мкм;

— в слое Ni[Cg] – границы между отдельными частицами практически не различаются, номежду никелем и графитомчетко имеются «рваные» границы, а частицы никеля на шлифе выглядят как отдельные вкрапления с размерами толщиной 1...10 мкм и длиной 10..60 мкм;

— на границе со слоем *NiCuIn* преобладают частицы никеля с размерами выступов над поверхностью слоя *R* = 1...5 мкм;

— слой*MoS*₂, пропитанный эпоксидным лаком— в значительной степени нивелирует разнотолщинность твердосмазочных слоев покрытия и уменьшает шероховатость, т.к. при нанесении лак растекается по поверхности, заполняя все неровности;

— несмотря на то, что плазменное напыление покрытий на образцы – свидетели, близкие по форме к реальному хвостовику лопатки, роботизировано, толщина покрытия оказалась неравномерной различных зонах хвостовика «ласточкина хвоста», а суммарная толщина покрытий на поверхностях с различной геометрией отличалась на 20...30%.

Толщина наносимыхслоёв зависит от состава покрытий, изменяясь для:

— NiAl –от 10 мкм до 65 мкм;

*— NiCuIn –*от 15 мкм до 90 мкм;

- Ni[Cg] -от 15 мкм до 70 мкм

Химический состав покрытий NiAl и NiCuIn соответствует химическому составу порошка, используемого при формировании этих слоев, а состав слоя

Ni[Cg] хотя соответствует исходному порошку, однако исследования состава покрытия показали неоднородное содержание углерода по толщине: на наружной поверхности значительно большее, чем внутри слоя.

Это вероятно связано с тем, что порошок Ni[Cg] представляет собой частицы графита, плакированные никелем. При ускорении такой частицы Ni[Cg] в плазменной струе никель расплавляется, не смачивая графит, и при соударении с ранее напыленным покрытием большая доля никеля перераспределяется, увеличивая толщину никелевой оболочки частицы в нижней части, и уменьшая ее в верхней. Из-за меньшего удельного веса углерода, содержащегося в каждой частице порошка, он не в состоянии глубоко внедриться в расплавленный никель, концентрируясь вблизи поверхности покрытия.

Для использования в высоконагруженных узлах трения с повышенным ресурсом при фреттинг-износе наиболее перспективны относительно толстые (до 200...300 мкм) ТСП, основу которых составляют износостойкие матрицы из неорганических материалов (см. рис. 4.11). В этих покрытиях основную функциональную нагрузку несет слой 3 – носитель ТСП, который может быть выполнен как из мономатериала, так и представлять собой матричную композицию из различных компонентов, Гарантирующих синергетическое повышение эксплуатационных характеристик ТСП. Слой 4 представляет собой или пропиточный слой с ТСП или слой твердой смазки в виде мономатериала без матрицы, являющийся прирабатываемым слоем с низкой сдвиговой прочностью, и служащий более быстрому и эффективному выходу покрытия на рабочий режим. Важным элементом в обоих типах покрытий является наличие адгезионного подслоя 2, функции которого может выполнять композиционный слой (подслой) на подложке, получаемый плазменным напылением, диффузионным насыщением или ионной имплантацией.



В качестве базового материала покрытия, способного обеспечить высокую несущую способность контактирующих поверхностей при сохранении их антифрикционных свойств и износостойкости, а также пригодного для формирования покрытий методом плазменного напыления, были использованы порошки плакированного никель-графита Ni[Cg] производства (OAO)«Институт Гипроникель», Санкт-Петербург) и порошок производства компании Sulzer-Metco. При этом наличие никеля должно было обеспечить достаточно жесткий и прочный каркас твердосмазочного покрытия, a [Cg] спо-собствовать повышению его износостойкости. В качестве второго синерге-тического компонента такого покрытия рассматривался MoS2, смешанный с эпоксидным лаком.

Общие выводы

1.Предложена физическая модель разрушения деталей малоподвижных соединений при воздействии фреттинга в процессе эксплуатации. Установлено, что основными параметрами процесса фреттинг-коррозии являются: амплитуда относительных перемещений сопряженных поверхностей A_p,мкм; давление p, МПа в зоне контакта; частота циклического смещения сопряженных поверхностей v; количество циклов нагружения N_{фp}; природа контактирующих материалов; внешняя среда и температура T.

2. Испытаниями материалов лопаток компрессора в условиях фреттингусталости выявлена роль основных факторов процесса фреттинга амплитуды относительных возвратных перемещений A_p и давления р в снижении сопротивления усталости основных конструкционных материалов, применяемых для современных лопаток компрессоров, дисков и валов.

3. Получены зависимости вида $\sigma^{\phi p}_{-1} = f(a)$ и $\sigma^{\phi p}_{-1} = f(p)$ с учетом влияния фреттинга и показано существование некоторого критического диапазона величин амплитуд A_p перемещений и давлений р, при которых имеет место наиболее резкое снижение сопротивления усталости исследованных материалов, поврежденных фреттингом при A_p = var и p = const.

4. Металлографическими исследованиями образцов и деталей, поврежденных фреттингом, установлено, что очагами разрушения материала являются поверхностные микротрещины, образовавшиеся у границ локального контакта под действием знакопеременных нормальных и касательных напряжений или подслойные микротрещины, возникающие от действия касательных напряжений в центре локального контакта;

— в зоне контакта при относительных перемещениях поверхностей сопряженных деталей в зависимости от соотношения касательных τ_a и нормальных σ_a напряжений может 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 при этом составляет 0,2 ÷ 0,4;

— абразивное разрушение с преобладанием процесса схватывания (грубые каверны, налипание материала) и образованием продуктов окисления при коэффициенте трения $f = 0,4\div0,55$:

4. Дана оценка несущей способности соединений лопаток компрессора с поверхностью пазов диска компрессора при действии фрретинга. Испытания на фреттинг - усталость показали, что для титановых сплавов степень повреждения оказывается существенно ниже, чем при испытаниях на усталость в условиях фреттинга.

5. Для различных сочетаний пар из ряда материалов определены значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений $K_{\sigma}^{\phi p}$, необходимые для оценки пределов выносливости материала в условиях фреттинга:

— величина эффективного коэффициента концентрации сплава BT8 с учетом 90% доверительного интервала среднее значение предела выносливости для вероятности разрушения 0,5составляет $K_{\sigma} = 2,25 \div 4,25;$

— для стали 13Х11Н2ВМ Φ К_{σ} = 1,9 ÷ 2,4;

— для сплава АК4-1 К $_{\sigma} = 1,4 \div 1,85.$

6. На металлических моделях двухзамковых соединений типа "ласточкин хвост" в условиях действия статического растяжения и переменного изгибающего момента исследована динамическая напряженность 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;

величины статической составляющей осевой нагрузки;

- соотношения жесткостей между профильной частью лопатки и

хвостовиком;

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

 с ростом статической составляющей величина относительного момента в хвостовике увеличивается;

 с ростом податливости профильной части лопатки величина относительного момента в хвостовике уменьшается.

7. Анализ результатов усталостных испытаний сплавов АК4-1, ВТ8 и стали 13Х11Н2ВМФ 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 соответствующих значений, определенных для данного материала при стандартных испытаниях на МнЦУ.

8. Наряду с конструктивными мероприятиями, способствующими повышению сопротивления усталости замковых соединений целесообразно применение:

 технологических операций, сопровождающихся поверхностным пластическим деформированием и формирующими сжимающие остаточные напряжения (гидрогалтовка, ультразвуковая обработка);

— мягких пластичных покрытий (серебрение, ВАП, NiInu др.), которые могут повысить предел выносливостиот 15 до 50%. Положительный эффект технологических операций сохраняется и при повышенных температурах.

Литература

1. Быков Ю. Г., Петухов А. Н., Черкасова С. А. Циклическая трещиностойкость титановых сплавов ВТЗ-1 и ВТ25 // Физ.-хим. механика материалов.1990. № 3. С. 49 - 53.

2. Костецкий Б.И, Федоровский Л.Х., Бершадский Л.И., Шульга О.Б. Фреттинг-процесс. // Трение и износ. 1989. № 3. С.36 - 39.

3. Кузнецов, Н.Д., Цейтлин. В.И., Технологические методы повышения надёжности деталей // машин: справочник -М.: Машиностроение. 1993. 304 с.

4. Петухов, А.Н. Многоцикловая усталость материалов и деталей газотурбинных двигателей // Проблемы прочности. 2005. №3 (375). С.5-21.

5. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. // М.: Машиностроение. 1993. С.185-193, С.207-209.

 Петухов А.Н. Усталость замковых соединений лопаток компрессоров. // Тр. ЦИАМ.1987. № 1213. 36с.

7. Петухов А. Н. Метод оценки предела выносливости деталей при фреттинг-коррозии. // Проблемы прочностии динамики в авиадвигателестроении: Сб. статей. Вып.3.-Тр.ЦИАМ. 1985. №1109. С.225-238.

8. Петухов А.Н., Павлов Ю.И., Хаинг Мин. Прочность замковых соединений лопаток компрессора при циклическом нагружении. // Авиационная промышленность. 2011. №-3. С. 42-44.

9. Петухов А. Н. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов с учётом влияния эксплуатационных повреждений фреттингом // Механическая усталость металлов. Материалы VI Международного коллоквиума. Киев: Наук, думка, 1983. С.381-386.

10. Петухов А.Н., Павлов Ю.И., Хаинг Мин. Обеспечение несущей способности замковых соединений лопаток компрессора авиационного двигателя при действии фреттинга. // Авиационная промышленность. 2012. №1. С.55 - 57.

11. Петухов А. Н. Механизм фреттинга и фреттинг-усталость

высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД и ЭУ // Тр. ЦИАМ. 2008. №.1338. 204с.

12. Смыслов А.М., Селиванов К.С. Повышение долговечности деталей машин в условиях фреттинга. // Уфа: Гилем. 2005. 180с.

 Улиг Г.Г., Реви Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику: пер. с англ. А. М. Сухотина и А. И. Хентова (под ред. А. М. Сухотина.) - Л.: Химия, Ленинградское отделение, 1989. 455с.

31.Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия:nep.c англ.(под ред. Г.Н. Филимонова.) // Л.: Машиностроение. 1976. 270с.

14. Хаинг Мин, Павлов Ю.И. Оценка сопротивления усталости конструкционных материалов в условиях действия фреттинг-коррозии // Двигатель. 2010. №.6. С.20-23.

15. Хаинг Мин, Петухов А.Н., Павлов Ю.И,. Алгоритмы экспериментального исследования процесса фреттинг-коррозионого взаимодействия деталей авиационных двигателей. // Научные труды МАТИ. Выпуск 17. М.: МАТИ. 2010. С.138-140.

16. Chambon L. and Journet B. Modeling of fretting fatigue in a fracture mechanics framework // Tribology Int. 2006. No.39. P. 1220 – 1226.

17. Conner B. P., Lindley T. C., Nicholas T., and Suresh S. Application of afracture mechanics based life prediction method for contact fatigue // Int. J.

Fatigue. 2004. No. 26. P. 511 – 520.

18. Farris, T.N., Murthy H., High Temperature Fretting Fatigue of Single Crystal Nickel // Proc.l0th Nation. Turbine Engine, HCF Conference, New Orleans. LA, March 8-11, 2005. P.123-134.

19. FernerA.J., FieldJ.K., Trans N.E. Coast Instn.MeekEngrs.Shipbladrs.1960. Vol.76.P.186-190.

20. FennerA.J., Field J.E. A study of the onset of fatigue damage due to fretting Trans. // North East Coast Inst. of Eng. and Shipbuilders. 1960. Vol. 4.P. 83-190

21. Fretting - Fatigue crack initiation mechanism in TI-6AI-4V. Namjoshi S.A.,

Mall S., Jain VK, Jin O. Fatigue FractEngngMater.Struct. // Science Ltd. 2002. №25. P.955-964

22. Fretting fatigue. Edited by Waterhouse R.B. "Applied Seiencepulischer, LTD" London. 1981.P.244 - 251.

23. Funk W. EinPrufverfahrenzur Untersuchund des Einflusses der Reibkorrosion auf die Dauerbarkeit. // Matehalprufung, 1969.Bd. 11, №7. P. 221-260.

24. Garcia D. B. and Grandt A. F. Application of a total life prediction model for fretting fatigue in Ti–6Al–4V // Int. J. Fatigue. 2007. No.29. P. 1311 – 1318.

25. Golden P.J., Grandt A.F. Characterisation of Fretting and fretting Fatique Induced Cracks in Ti-6Al-4V7/4th // National Turbine Engine Cycle Fatique Conference, Monterey, CA, Februy 1999.P. 153-161

26. Houghton D., Wavish P. M., Williams E. J., and Leen S. B. Multiaxial fretting fatigue testing and prediction for splined couplings // Int. J. Fatigue. 2009. No. 31.
P. 1805 – 1815.

27. Jacob M. S. D., Arora P. R., Saleem M., et al. Fretting fatigue crack initiation:An experimental and theoretical study // Ibid. 2007. No. 29. P. 1328 – 1338.

28. Jacob M. S. D., Arora P. R., Sapuan S. N., et al. Experimental evaluation of fretting fatigue test apparatus // Ibid. 2007. No. 29. P. 941 – 952.

29. Kuznecov N.D., Ceitlin V.I., Wolkov V.I., Technological Method rise of Reliability Component Machin. // Reference book. M.: Machinostroenie. 1993.304 p.

30. Navarro C., Munoz S., and Dominguez J. On the use of multiaxial fatigue criteria for fretting fatigue life assessment // Int. J. Fatigue. 2008. No. 30. P. 32 – 44.
31. Nowell D., Dini D., and Hills D. A. Recent developments in the understanding of fretting fatigue // Eng. Fract. Mech. 2006. No.73. P. 207 – 222.

32. Munoz S., Proudhon H., Dominguez J., and Fouvry S. Prediction of the crackextension under fretting wear loading conditions // Int. J. Fatigue. 2006. No.28. P. 1769 – 1779.

33.Petuckhov A.N. Problem fretting-fatigue in GTE. RELMAS-2008. Assessment of Reliability of Materials and Structures: Problems and Solutions. // International

Conference. S. Peter-burg, Russia, 17-20 June, 2008. Vol.1 S.- Peterburg, Russia, Polytechnical Publishing House. 2008. P.285-287

34.Rossino L. S., Castro F. C., Bose Filho W. W., and Araujo J. A. Issues on the mean stress effect in fretting fatigue of a 7050-T7451 Al alloy posed by new experimental data // Int. J. Fatigue. 2009. No. 31. - P. 2041 - 2048.

Интернет-ресурсы

1. http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=266 M.A. Ключников, Крюков Восстановление ответственных ГТД деталей V3ЛОВ И методами высокотемпературной пайки и сварки // Материалы 3-й Всероссийской практической конференции-выставки «Технология ремонта, восстановления, обновления оборудования упрочнения И машин, механизмов, И Металлоконструкций». СПб, Изд-во СПбГТУ. 2001. С.73-78.

2. <u>http://www.vntr.ru/ftpgetfile.phpid=266</u> Материалы 10-й Юбилейной Международной научно-практической конференции «Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструментов и технологической оснастки.» // СПб, Изд-во СПбГТУ, Часть 1, Московский авиационный институт (государственный технический университет), Россия, Москва. 2008. С.193-200.

3. <u>http://airspot.ru/book/file/942/rabochije_lopatki_aviacionnyh_gtd.pdf</u>

Дорошко С.М., Коняев Е.А., Чемохуд Е.В. Конструкция и прочность авиационных ГТД. // Конспект лекций-Р.: РКИИ ГА. 1983. 80с.

4. <u>http://airspot.ru/book/file/942/rabochije_lopatki_aviacionnyh_gtd.pdf</u>

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

5. <u>http://airspot.ru/book/file/942/rabochije_lopatki_aviacionnyh_gtd.pdf</u> Лозицкий Л.П. и др. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей. // М.: Воздушный транспорт. 1992. 535с.