

УДК 621.452.3:539.4

А. Н. Петухов, д.т.н., проф., ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», г. Москва

E-mail: petukhov.an@mail.ru

Фреттинг и фреттинг-усталость конструкционных материалов и деталей

Рассмотрены проблемы фреттинг-усталости возникающие в малоподвижных соединениях. Рассмотрен механизм фреттинг-усталости и основные факторы, определяющие интенсивность снижения предела выносливости.

Ключевые слова: фреттинг-коррозия, фреттинг-усталость; предел фреттинг-выносливости, амплитуда относительных перемещений поверхности контакта, давление в зоне контакта, число циклов нагружения.

A. N. Petukhov

Fretting and Fretting-Fatigue of Materials and Components

The models of fretting corrosion and fretting fatigue mechanisms and the processes in the contact zone of parts subjected to fretting fatigue are discussed. Experimental data on the fretting and fretting fatigue mechanisms and on the effect of fretting on the fatigue resistance of structural materials are presented.

Keywords: fretting - fatigue, fatigue, residual stress, , fatigue, high cycle fatigue (HCF), compressive stresses in metallic components.

Фреттинг-коррозия - это процесс, возникающий при циклическом нагружении в зоне контакта сопряженных деталей. Величина амплитуды относительных перемещений в зоне контакта деталей, достаточная для возникновения процесса находится в пределах упругих деформаций поверхностного слоя детали. Максимальная величина амплитуды может составлять 200-300 мкм. Фреттинг-коррозия наблюдается при контакте металлов и при контакте металлов с неметаллами. Особенно ярко проявляется фреттинг-коррозия в малоподвижных и прессовых соединениях: болтовых, шлицевых, замковых, хиртовых и фланцевых соединениях, местах напрессовки подшипников на вал и т. п., а также в электрических контактах.

Наиболее тяжелые последствия этого процесса - фреттинг-усталость, т.е. усталостные разрушения деталей, поврежденных фреттинг-коррозией. Предел выносливости, соединения при этом может снижаться в 1,5...5 раз.

Наиболее тяжелыми последствиями процесса фреттинга являются усталостные разрушения (фреттинг-усталость) пресовых и малоподвижных соединений, вызванные резким снижением предела выносливости из-за повреждений при фреттинге материала детали [3...7].

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

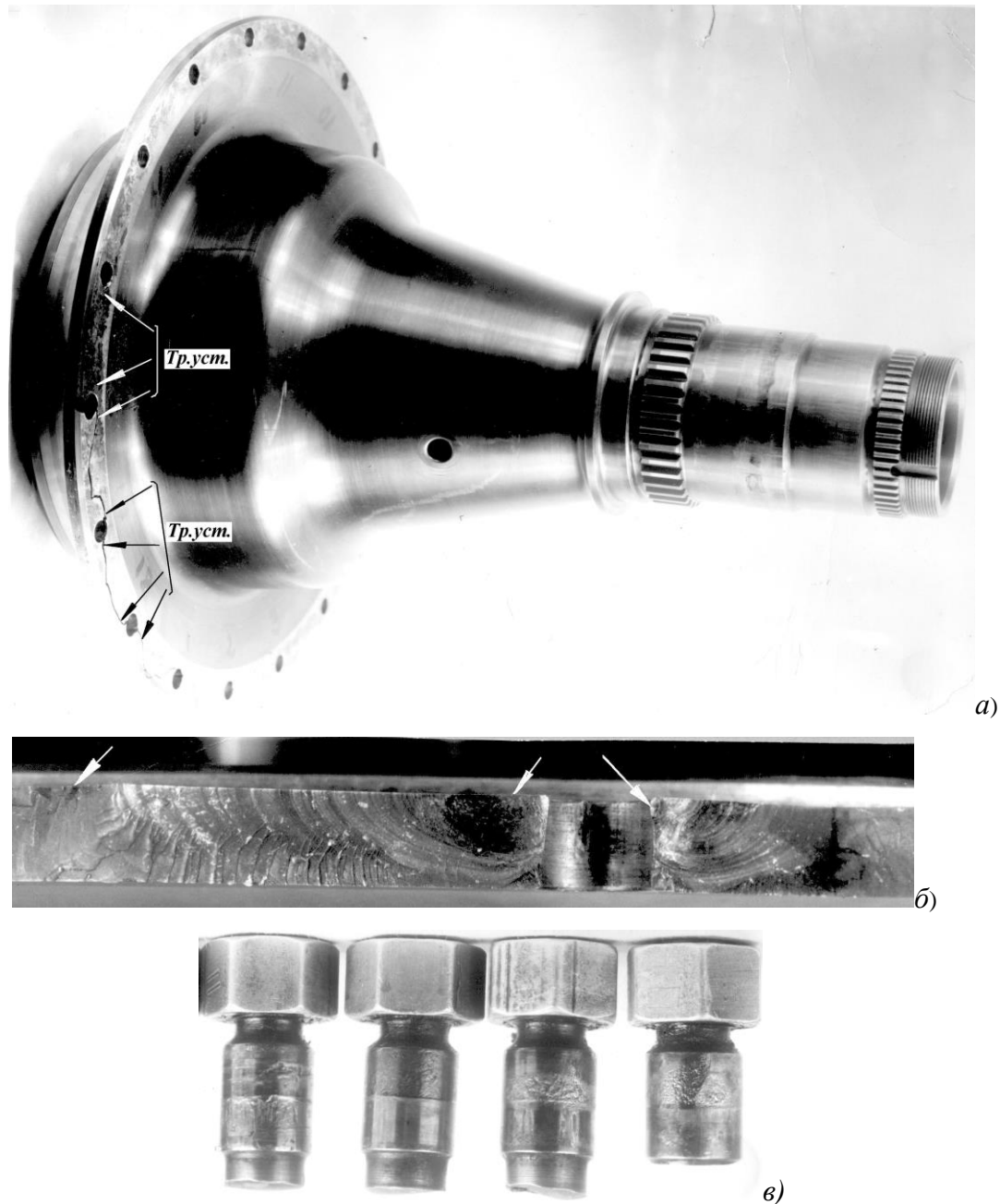


Рис.1. Разрушение вала-шестерни по фланцу в зоне болтовых соединений с шестерней от фреттинг-усталости (стрелками указаны очаги усталостных разрушений):

- 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, поврежденных фреттингом, разрушенных от усталости

Несмотря на то, что явление фреттинга находится в поле зрения исследователей более 100 лет, удовлетворительной теории этого процесса до сих пор нет, а прогнозирование сопротивления фреттинг-усталости при проектировании деталей машин, за редким исключением, не делается. В справочниках сведения о пределах фреттинг-усталости весьма ограничены.

Механизм возникновения изнашивания и кинетики развития повреждения поверхностей в условиях фреттинг-коррозии являются наиболее сложными по своей природе процессами [1]. Механизм фреттинга неоднозначен. С одной стороны имеют место физико-химические процессы, протекающие на молекулярном уровне, в следствие чего в зоне контакта образуются окислы металлов сопряжённых деталей. С другой стороны, имеют место механические процессы разрушения в субмикроскопических и макроскопических объемах поверхностного слоя в зоне контакта. Оба эти процесса тесно связаны между собой.

Известные предложения о моделях процесса [3,4] обычно основаны на зависимости интенсивности процесса, как функции потери массы, от механических параметров процесса. Иногда при этом, основываясь на принципах равновесной термодинамики, дополнительно учитывают физические и химические свойства взаимодействующих материалов. Однако указанные модели в большинстве случаев основанные на методиках, применяемых при изучении процессов износа, не позволяют прогнозировать влияние фреттинг-коррозии на сопротивление усталости.

Роль химического фактора оценивается по результатам взаимодействия неоднородных конструкционных материалов в различных средах, отличающихся химической активностью, или используется ряд активности Вольта. Однозначной корреляции между механическими свойствами материалов, например, по параметру твердости, и сопротивлением фреттинг-усталости обнаружить не удается. В частности, при одних и тех же параметрах процесса фреттинга (величине амплитуды относительных сопряженных поверхностей перемещений и величине давления в зоне контакта) повреждаемость поверхности контакта например нержавеющей стали *13X11H2B2MФ* в состоянии после отпуска на твердость $HV=2800$ МПа выше, чем после отпуска на твердость $HV=3100$ МПа, однако степень снижения предела выносливости при этом оказывается существенно ниже [4-6]. Это можно объяснить тем, что в первом случае преобладают процессы абразивного износа, которые способствуют удалению слоев, содержащих усталостные микротрещины. Во втором случае преобладают процессы схватывания материалов, создающие благоприятные условия для образования и развития усталостных микротрещин.

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

Металлографические и электронно-микроскопические исследования показывают, что тонкие поверхностные слои в зоне фактического контакта находятся в высокодисперсном состоянии, включающем, ювенильные частицы материала контактирующих пар и их окислы. При этом состав и свойства окислов в зоне контакта при воздействии циклических нагрузок существенно отличаются от окислов, образующихся в стационарных условиях. Например, в процессе испытаний на фреттинг-коррозию титановых сплавов не удавалось зафиксировать существенного прироста электросопротивления в зоне контакта, в то время как в стационарных условиях в зоне электросопротивление окислов составляло несколько КОм.

На поверхности образцов из титановых сплавов, поврежденных фреттингом, обнаруживаются не только последствия механического воздействия на поверхность твердого абразива, но и воздействия вязкой аморфной среды, образованной окислами. Поэтому результаты исследования физических и химических свойств продуктов повреждения, образующихся при фреттинге на поверхностях контакта нельзя считать объективными, т.к. они являются скорее следствием процесса, а не реально действующим фактором при фреттинге.

Рассматривая процесс фреттинга с точки зрения механики твердого тела, можно считать, что он является одним из видов контактного взаимодействия твердых тел, например, как частный случай контакта полусфер или полуцилиндров при наличии нормальной и касательных составляющих сил от внешней нагрузки и сил трения. Возникающее в зонах контакта напряженное состояние является сложным, где действует одновременно три составляющие: от нормального напряжения сжатия, сила трения и знакопеременные касательные напряжения. Таким образом, элементарный объем материала в зоне контакта находится в условиях трехосного напряженного состояния и подвергается циклическому деформированию.

Теоретические и экспериментальные исследования [2-4], связанные с изучением напряженного и деформированного состояния при локальном контакте тел, показывают, что наиболее напряженными являются две

зоны: зона крайнего поверхностного слоя, располагающаяся на некоторой глубине, и зона, где касательные напряжения достигают максимума. При некоторых внешних условиях нагружения обе зоны смыкаются. Установлено сложное взаимодействие поверхностей, имеющих проскальзывание в пределах контактной площадки при нормальном сжатии, и значительное воздействие сил трения на напряженное состояние материала в зоне контакта и вблизи нее [2,4-6]. Возвратные перемещения поверхности детали в зоне контакта сопровождаются циклическими изменениями напряженной во всех микрообъемах материала по площадкам фактического контакта. Микро- и макронеровности, существующие на рабочих поверхностях деталей, вызывают значительные изменения контактных напряжений в поверхностном слое площади контакта, которые не учитываются при решении общей контактной задачи. Процесс проскальзывания способствует уменьшению местной концентрации напряжений и подобен началу пластической деформации в упругих телах. Преодоление сил трения способствует диссипации энергии, является, с одной стороны -источником конструк-тивного демпфирования, а с другой - процесса фреттинга - усталости.

Учитывая дискретность контакта, характерную для реальных деталей, определяемую шероховатостью поверхности, можно утверждать, что в зоне контакта всегда найдутся микро- и макрообъемы в виде выступов, где максимальные эквивалентные циклические напряжения превысят либо предел прочности (текучести) материала, либо величину ограниченного предела выносливости. Следовательно, при соответствующем числе циклов нагружения на поверхности контакта будут иметь место статические, квазистатические, малоцикловые или усталостные разрушения материала.

Эти процессы в сочетании с физико-химическим взаимодействием материалов, образующих химические соединения, могут интенсифицироваться или тормозиться, являясь постоянными источниками образования свободных микрочастиц и окислов, участвуя в разрушении микрообъемов материала, образовании каверн и микротрещин. Возникающие повреждения в микрообъемах поверхностного слоя играют роль концентраторов напряжений или начальных трещин, дальнейшее развитие которых может в отдельных случаях прогнозироваться по законам линейной механики разрушения.

Важнейшими параметрами, определяющие интенсивность процесса фреттинг-коррозии, являются:

- амплитуда относительных перемещений A_p ;
- величина давления в зоне контакта p ;
- частота колебаний при относительных перемещениях;
- число циклов нагружения N ;
- природа материалов;

- окружающей среда.

Проведенный анализ методик, применявшихся для исследования этого процесса, показывает что во многих из них параметры оценивались косвенно. Поэтому, если это возможно, то полученные при этом результаты требуют уточнения.

В работах [2,5] для ряда высокопрочных конструкционных сталей и сплавов получены зависимости для коэффициента влияния фреттинг-коррозии на предел выносливости от амплитуды относительных перемещений A_p и от величины давления в зоне контакта p . Поэтому наибольшее снижение предела выносливости наблюдается при таких сочетаниях A_p и p , когда в зоне контакта роль абразивных повреждений минимальна при $A_p = 5 - 10$ мкм, а наименьшее снижение - при $A_p \gg 20$ мкм.

Практически одновременно с автором близкие результаты были получены в работе [7] на сталях *Cк35*, *AISI 9310* и *4130*.

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

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

где A_0 - амплитуда перемещений при $p = 0$; A_p - амплитуда при $p > 0$.

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

$$(K_\sigma^\phi)^n + f_p^n = 1, \quad (2)$$

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

где n , η , k - определяются из эксперимента. Тогда

$$K_\sigma^\phi = [1 - (\eta B)^n]^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

Влияние частоты нагружения связано с A_p . При $A_p < 20$ мкм сопротивление усталости не зависит от частоты, при $A_p > 100$ мкм влияние фреттинга на усталость с увеличением частоты ослабевает, что связано с увеличением скорости относительных перемещений и резким возрастанием роли процессов абразивного износа.

В работе [4] показано, что с ростом амплитуды напряжений долговечность детали при испытаниях на фреттинг усталость может увеличиваться, а кривая усталости при этом принимает *S*-образный вид, т.е. зависимость числа циклов нагружения и степень снижения предела выносливости не выражается монотонной функцией. Для процесса фреттинга типично чередование максимумов и минимумов повреждения материала (табл. 1). В то же время общие закономерности влияния повреждения материалов фреттингом на сопротивление усталости обнаруживаются при $N_p = 10^5$ циклах нагружения.

Таблица 1

Условия испытаний сплава АК4-1 на фреттинг-коррозию и результаты последующих испытаний на усталость образцов, поврежденных фреттинг-коррозией

Режимы испытаний на фреттинг-коррозию при $A_p = 5$ мкм, $P = var$		Режимы испытаний на усталость поврежденных фреттинг-коррозией образцов. Изгиб с вращением.	
Нормальное давление P , МПа	Число циклов при фреттинг- коррозии, $N \cdot 10^{-6}$	Амплитуда напряжений σ_v , МПа	Число циклов до разрушения $N_{P \cdot 10^6}$, ц
5	0.135	130	40
5	1.53	130	12.4
5	5.85	130	100 не разрушился
50	0.27	105	100 не разрушился
50	2.7	105	1.12

Примечание: на каждом режиме испытано не менее 10 образцов

Наибольшее распространение при исследовании сопротивления фреттинг-усталости получило соединение типа "вал-втулка", нагружаемое циклическим плоским или круговым изгибом, растяжением-сжатием, кручением и др. Эти испытания позволяют, в той или иной мере воспроизвести условия нагружения прессовых или малоподвижных соединений. Для некоторых видов нагружения удается при этом получить зависимость, а иногда $\sigma_{-1} = f(p)$. Такие испытания полезны при выборе технологических и конструктивных способов подавления фреттинг-коррозии и для оценки несущей способности соединения типа «вал-втулка» [5,8-11].

Результаты испытаний образцов и деталей на фреттинг-усталость будут практически очень близкими, если в результаты испытаний образцов ввести поправки, учитывающие особенности напряженного состояния детали. Отличия результатов испытаний на усталость материала, поврежденного фреттингом, и на фреттинг - усталость наблюдается лишь у титановых сплавов, что свидетельствуют, в первую очередь, об особенностях механизма повреждения титанового сплава при фреттинге и при фреттинге- усталости о чем говорилось выше. Зависимость сопротивления фреттинг-усталости от природы материала сопряженных пар, их механических свойств, твердости достаточно сложна, т.к. при фреттинге независимо друг от друга идут абразивные, адгезионные и усталостные процессы, связанные с механическими повреждениями площадок контакта. Кроме того, могут иметь место и электрохимические процессы, при которых между материалами сопряженных пар или их структурными составляющими могут возникать гальванические пары.

В работе [6] получены значения $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ для алюминиевого сплава ДБ в паре с различными материалами и соответствующие им значения электродных потенциалов φ_3 . Хотя с повышением потенциала величина $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ уменьшается, но однозначной зависимости между $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ и φ_3 не обнаружено.

Анализируя результаты испытаний на фреттинг-усталость можно так же отметить, что степень снижения предела выносливости в значительной мере зависит от условий нагружения детали. Если момент, действующий на соединение, передается от втулки к валу, то реализуется «жесткое» нагружение, если он действует только на вал - реализуется «мягкое» нагружение. В табл. 2 приводятся данные по фреттинг-усталости соединений типа вал-втулка для различных конструкционных материалов при «мягком», а в табл. 3 для тех же соединений при «жестком» нагружении.

Таблица 2

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

№№ вариант	Материал		Давление $p, \text{МПа}$	Предел выносливости $\sigma_{-1}^{\text{фр}}, \text{МПа}$	$K_{\sigma}^{\text{фр}}$
	образца	накладки			
1	Сплав АК4-1	Сплав АК4-1	-	160	1,0
2			5	143	1,12
3			72,5	100	1,6
4			100	125	1,28
5	Сталь 13X11H2BMФ (отп.580 ⁰ С)	Сталь 13X11H2BMФ (отп.580 ⁰ С)	-	550	1
6			10	310	1,77
7			100	260	2,1
8			200	280	1,96
9			100	290	1,9
10			10	330	1,67
11			100	300	1,83
12	ВТ8	-	-	360	1,0
13		ВТ3-1	10	200	1,8
14		ВТ3-1	100	110	3,27
15		ВТ3-1	200	100	3,27
16		Сталь	10	170	2,12
17		13X11H2BMФ (отп.580 ⁰ С)	100	105	3,43
18		13X11H2BMФ (отп.580 ⁰ С)	200	200	1,8

Можно отметить, что при «мягком» нагружении отмечается тенденция увеличения значений $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ с ростом давления в контакте, однако при этом существует некоторое критическое значение P , при котором $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ достигает максимальной величины. Кроме того, величина $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ может изменяться в зависимости от материала контактирующих пар. Для пары стальной вал и титановая втулка величина $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ снижается, а для титанового вала со стальной втулкой она увеличивается.

Показано, что при «жестком» нагружении коэффициент снижения предела выносливости $K_{\sigma}^{фр}$ может быть в 1,5 - 3 раза выше, чем при «мягком».

Несмотря на более высокие значения $K_{\sigma}^{фр}$, получаемые при жестком нагружении, эффективность применения защитных покрытий, особенно в сочетании с упрочняющими поверхностями обработками, оказывается достаточно значительной.

При повышенных температурах проблема фреттинг-усталости сохраняется. Это показали исследования натуральных малоподвижных соединений компрессора ГТД [5,6,8-12], изготовленных из различных конструкционных материалов (титановых сплавов, сталей, мартенситного и аустенитного класса, никелевых сплавов).

Таблица 3

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

№ варианта	Вид обработки поверхности контакта	Предел фреттинг-выносливости, МПа	Эффективный коэффициент концентрации $K_{\sigma}^{фр}$	Примечание
1	Шлифование	180	2.78	вал и втулка из стали 13ХПН2В2 МФ Давление в контакте $p = 450$ МПа
2	тоже, что п. 1 + Ag	260	1.92	
3	тоже, что п. 1 Ni - Cd	225	2.22	
4	тоже, что п. 1 + обкатка	320	1.56	
5	тоже, что п. 4 + Ag	310	1.61	
6	тоже, что п. 4 + Ni Cd	330	1.52	
7	тоже, что п. 4 + ВАП	320	1.56	
8	Фрезерование	120	3.75	вал и втулка из сплава ВТ8
9	Шлифование	120	3.75	
10	тоже, что п. 8 + обдувка	170	2.65	Покрытие WC, $P=300$ МПа
11	тоже, что п. 8 + обдувка микрошариками	200	2.25	

Условия нагружения этих конструктивных элементов, относятся к «жесткому». Можно отметить, что минимальная повреждаемость фреттинг-усталостью характерна для равноосных никелевых сплавов, максимальная - для титановых. Значения $K_{\sigma}^{фр}$ для высокопрочных конструкционных материалов остаются значительными и при повышенных температурах, а величина предела фреттинг-выносливости изменяется пропорционально изменению механических свойств материала при повышении температуры.

Методика оценки предела выносливости деталей при наличии фреттинг-усталости изложена в работах [2,5,6]. В основу методики

положен учет особенности напряженно-деформированного состояния детали в зоне контакта и данные о значениях K_{σ}^{fp} , включающие влияние конструктивных технологических и эксплуатационных факторов.

Таким образом, систематическое изучение механизма фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости, наличие расчетных и экспериментальных сведений о напряженно-деформированном состоянии конструкции позволяют, с одной стороны, прогнозировать реальный предел выносливости детали, а с другой - выбрать научно обоснованные и наиболее оптимальные конструктивные решения и технологические методы, снижающие влияние фреттинг-коррозии на сопротивление усталости.

Список литературы

1. **Когаев В.П., Дроздов Ю.Н.** Прочность и износостойкость деталей машин. М.: "Высшая школа", 1991 г., 320 с.
2. **Петухов А.Н.** Методические особенности исследования процесса фреттинг-коррозии в связи с усталостью материалов. В сб.: Физико-химическая механика контактного взаимодействия. Всесоюзная конференция. Киев, КИИГА, 1972, с.142
3. **Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В.** Фреттинг-коррозия металлов.г. Киев, "Техника", 1974, 272 с.
4. . **Fretting** fatigue. Edited by Waterhouse R.V. Applied Science pulischer. ZTD, London, 1981, 224 p.
5. **Петухов А.Н.** Сопротивление усталости деталей ГТД. -М.: Машиностроение 1993,240 с.
6. **Петухов А.Н.** Метод оценки предела выносливости деталей при фреттинг-коррозии. -В сб.: Проблемы прочности и динамики в двигателестроении. Вып. 3 М. ЦИАМ, 1985, с. 225 - 238 (Труды ЦИАМ № 1109).
7. **Funk W.** Ein Prufverfahren zur Untersuchung des Einflusses der Reibkorrosion auf die Dauerhaitbarkeit, Materialprufung, 1969, Bd. 11, № 7, s. 221 - 260.
8. **Похмурский В.И., Ниропович И.А.** - О влиянии природы конструирующих металлов на усталостную прочность валов.г. Львов, ФХММ, 1976, № 2. с. 66-68.
9. **Филимонов Г.Н., Белецкий Л.Г.** Фреттинг в судовых соединениях. Л.:"Судостроение", 1983, с. 296.
10. **Petuckov A.N.** Fretting and fretting-fatigue of materials and components. Fracture mechanics: successes and problems Collection of abstracts Part I.JCF-8. Organizing Karpenko Physico-Me-chanical Institute Lviv,1993, p.195 - 196

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

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

13. **Петухов А.Н.** Механизм фреттинга и фреттинг- усталость высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД и ЭУ. ТрудыЦИАМ №1338, М. ЦИАМ 2008 г. 210 с.

14. **Farris T.N., Grandt A.F., Matlik J.F.** Characterization of Fretting Fatigue of Nikel based Flloys 9th National Turbine Engine HCF Conference. New Orltans, LA, March 8-11, 2004.