

УДК: 621.1.001:621.438:539.431

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ МЭНСОНА

© 2014 А.М. Портер¹, С.А. Букатый², Д.П. Лёшин¹

¹Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск Ярославской области

²Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А.Соловьёва

Рассматривается прогнозирование малоциклового долговечности образцов и дисков газотурбинных двигателей (ГТД) методом универсальных наклонов – на основе уравнения Мэнсона и его различных модификациях. Уравнение Мэнсона получено в результате испытаний стандартных образцов на растяжение-сжатие, т.е. при одноосном напряжённом состоянии и симметричном цикле нагружения. При сложном напряжённо-деформированном состоянии в модификации уравнения введено среднее напряжение цикла, но чёткие рекомендации его определения отсутствуют. В работе предложены различные варианты представления среднего напряжения. За основу верификации различных модификаций были приняты результаты испытаний стандартных образцов с круглым сечением, образцов с замком «ласточкин хвост», вырезанных из дисков компрессора, а также натуральных дисков новых и бывших в эксплуатации. Испытания проводили при отнулевом цикле нагружения, приближенном к реальным условиям работы основных деталей ГТД. Путём сравнения результатов расчётов с экспериментальными данными выявлены наиболее эффективные варианты уточнения уравнения Мэнсона. При этом установлено значительное влияние на малоцикловую долговечность не только величины деформаций деталей, но и типа напряжённо-деформированного состояния. Поэтому наиболее эффективным оказалось использование интенсивностей напряжений. Установлено также, что уточнение уравнения, введённое Мэнсоном и Муралидхараном, применимо только для напряжённых состояний, близких к плоскому.

Малоцикловая усталость, уравнение Мэнсона, образцы и диски ГТД, испытания на малоцикловую усталость, прогнозирование долговечности, среднее напряжение.

В настоящее время основным методом расчёта малоциклового долговечности ответственных деталей ГТД является предложенный С.С. Мэнсоном метод универсальных наклонов [1]. При сложном напряжённом состоянии (НС), характерном для основных деталей ГТД в зонах концентрации напряжений, в ЦИАМ после специальных исследований было получено модифицированное уравнение [2]

$$\Delta \varepsilon = \frac{3.5(\sigma_{\text{дл}} - \sigma_m)}{E(t)} \cdot N^{-0.12} + \left(\ln \frac{1}{1 - \Psi(t)} \right)^{0.6} \cdot N^{-0.6}, \quad (1)$$

где σ_m – среднее напряжение цикла нагружения, а размах деформации $\Delta \varepsilon$ включает интенсивности размахов упругой и пластической составляющих деформаций:

$$\Delta \varepsilon = \frac{3}{2(1 + \mu)} \Delta \varepsilon_i^e + \Delta \varepsilon_i^{pl}. \quad (2)$$

Уравнение Мэнсона было получено при одноосном НС в процессе испытаний стандартных образцов на растяжение-сжатие при симметричном цикле нагружения. В этом случае $\sigma_m = (\sigma_{\text{нагр}} + \sigma_{\text{разгр}})/2$.

Но при сложном напряжённо-деформированном состоянии (НДС) чёткие рекомендации отсутствуют. Предлагается использовать наибольшее значение в цикле величины $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ при условии, что $\sigma_m > 0$. Но практика показывает, что результаты расчётов долговечности в ряде случаев значительно отличаются от результатов, полученных из эксплуатации двигателей, а также при испытании опытных образцов и деталей на малоцикловую усталость (МЦУ). В 1988 г. с целью повышения точности прогнозирования малоциклового долговечности сделано уточнение уравнения Мэнсона [3], исключающее использование σ_m . Поэтому в данной работе поставлена задача рассмотреть различные варианты определения среднего напряжения, а также уравнение [3], и сравнить результаты расчётов с результатами испытаний образцов и дисков, проведённых в Научно-производственном объединении «Сатурн». На основе анализа имеющихся рас-

чётных и экспериментальных данных испытаний можно сделать оценку эффективности применения уравнения Мэнсона и выбрать наиболее оптимальный вариант прогнозирования МЦУ деталей ГТД. Поскольку НДС основных деталей ГТД в рабочем цикле близко к жёсткому отнулевому циклу нагружения, то циклы нагружения опытных образцов и дисков приближали к рабочим. Для исключения дополнительных эффектов испытываемые детали и образцы упрочнению поверхностным пластическим деформированием (обдувка микрошариками и др.) не подвергались. Указанные выше расчёты малоциклового долговечности для различных вариантов представления σ_m осуществлялись в системе MathCad. Необходимые данные НДС в наиболее напряжённых местах образцов и дисков были получены расчётами в системе ANSYS.

Экспериментальные исследования

Для проведения сравнительных испытаний использовались стандартные круглые образцы диаметром 6,25 мм из материала ВТЗ-1, а также образцы с замком «ласточкин хвост» (рис. 1). Заготовки для стандартных образцов вырезали из полотна и ободной части дисков первой ступени КНД двигателя Д-30КУ-154, что позволило в дальнейшем оценить малоцикловую прочность материала дисков соответственно в радиальном и окружном направлениях. В соответствии с расчётными данными напряжённое состояние указанных участков не превышало 305 МПа, что даёт основание считать, что предварительная наработка при эквивалентных циклических испытаниях (ЭЦИ) или в составе двигателя не должна влиять на результаты испытаний на МЦУ.

Образцы с замком «ласточкин хвост» также вырезали из аналогичных дисков. Схема вырезки образцов показана на рис. 2. Для изготовления образцов использовались диски: а) новый без наработки (брак при изготовлении); б) прошедший ЭЦИ на УИР-3; в) бывший в эксплуатации на двигателе с наработкой 17995 часов / 5545 циклов. Все испытания

на МЦУ образцов и дисков проводились в нормальных условиях при температуре $\sim 20^\circ\text{C}$. Испытания стандартных образцов проводили по отнулевому трапецеидальному циклу с выдержкой 0,5 с при максимальной нагрузке деформацией $\Delta\epsilon$, равной 0,008; 0,010; 0,012 и 0,014 мм.

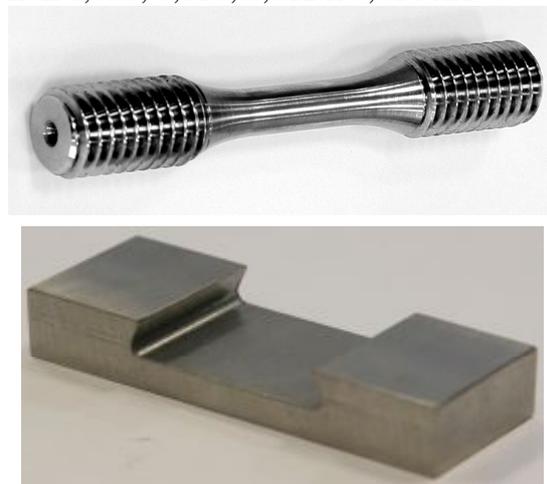


Рис. 1. Опытные образцы стандартные и с замком «ласточкин хвост» из сплава ВТЗ-1 для испытаний на МЦУ

Образцы с замком нагружали при консольной схеме крепления (рис. 3) на установке фирмы MTS модели 322 с толкающим усилием $P = 2,5 \pm 0,1$ кН по отнулевому трапецеидальному циклу нагружения частотой $f = 0,25$ Гц. Уровень напряжений $\sigma_{\max} = 1140 \pm 14$ МПа контролировали тензометрическим методом.

Результаты испытаний указанных выше образцов приведены в табл. 1 и 2. Из таблицы 1 следует, что рассеяние результатов испытаний стандартных образцов из заготовок, вырезанных в радиальном и окружном направлениях, практически одинаково. Это свидетельствует об однородности прочностных свойств материала дисков компрессора.

Результаты испытаний образцов с замком «ласточкин хвост» (табл. 2) из диска без наработки и из дисков с различной наработкой (ЭЦИ на стенде УИР-3 и на двигателе) близки по величине. Это можно объяснить тем, что предварительная наработка была далека от предельной, и до изготовления опытных образцов и последующего проведения сравнительных испытаний был значительный период вылёживания дисков и «отдыха» материала.

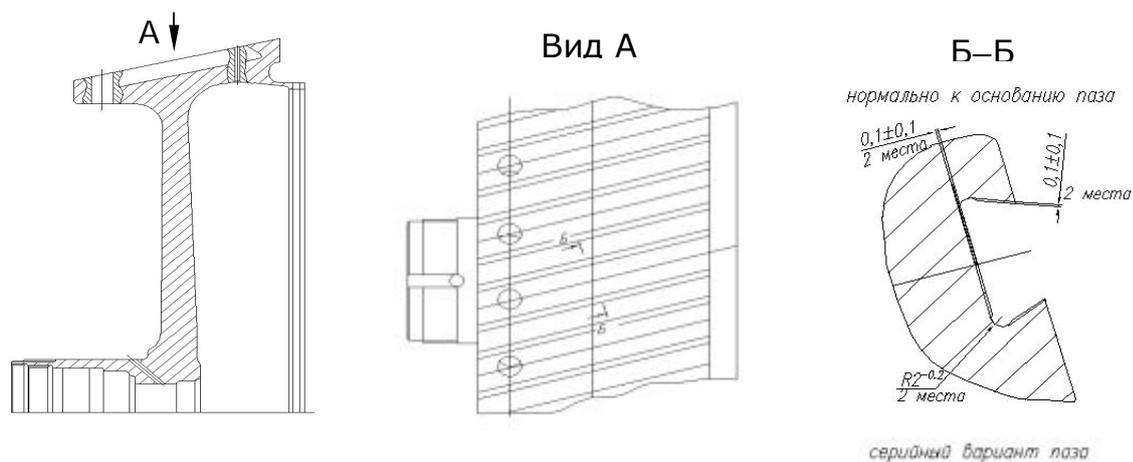


Рис. 2. Схема вырезки образцов с замком «ласточкин хвост»



Рис. 3. Нагружение образцов с замком «ласточкин хвост»

Следовательно, предварительная наработка проявила «эффект циклического упрочнения» материала [4], т.е. частично компенсировала его повреждаемость и привела к некоторому увеличению долговечности образцов, соизмеримой с долговечностью образцов из диска без наработки. С учётом предварительной наработки общее среднее количество циклов до разрушения возрастает до 20474 циклов, что существенно превышает количество цик-

лов для образцов из нового диска – 14756 циклов. Этот факт так же подтверждает влияние "эффекта циклического упрочнения". Но ограниченное количество испытаний не позволяет в настоящее время сделать окончательный вывод об эффективности «тренировки» дисков. Для подтверждения приведённых выше гипотез необходимо провести дополнительные исследования, положительные результаты которых могут служить основанием для введения в технологические процессы операции предварительной «тренировки» дисков и других основных деталей для повышения их долговечности в соответствии с патентом [5].

Наряду с испытаниями образцов были проведены ЭЦИ на стенде УИР-3: двух дисков 1 ступени КНД (материал ВТЗ-1) с приблизительно одинаковой предварительной наработкой порядка 3500 циклов в составе двигателей Д-30КУ-154; одного диска 0 ступени двигателя М70ФРУ (материал ВТ22И); 2 диска 9 и 10 ступеней, а также 3 варианта дисков 11 ступени КВД двигателя Д-30КУ-154 (материал ЭИ-961Ш). Испытания дисков 11 ступени проводили после следующих ремонтных доработок: 1-й доработки – прошивки переднего и заднего ряда шлиц на радиус $R = 0,65 \pm 0,1$ мм; 2-й доработки – срезки заднего ряда и аналогичной прошивки переднего ряда шлиц; 3-й (окончательной) доработки – прошивки переднего и срезки заднего ряда шлиц со вставкой вместо не-

го кольца. Необходимость указанных доработок дисков обусловлена появлением трещин после ~2000 циклов нагружения:

после 1-й доработки – в заднем ряде шлиц; после 2-й доработки – в контрольных отверстиях диска.

Таблица 1 - Результаты испытаний на МЦУ стандартных круглых образцов из дисков 1-ступени КНД двигателя Д-30КУ-154, материал ВТЗ-1

№ образца	Количество циклов до разрушения (индексы р и о обозначают радиальное и осевое направления вырезки заготовок образцов)			
	Нагружение растяжением по отнулевому циклу деформацией Δε, еод			
	Δε = 0,008	Δε = 0,010	Δε = 0,012	Δε = 0,014
1	8698 _р	13532 _р	8851 _р	3238 _р
2	12056 _р	9472 _р	4061 _р	2671 _р
3	17562 _р	11389 _р	5672 _о	2377 _о
4	13572 _о	9502 _р	7122 _о	2827 _о
5	17260 _о	8838 _р	6369 _о	2896 _о
6		6032 _р		2935 _о
7		11540 _о		
8		9982 _о		
9		13394 _о		
Среднее количество циклов	13830	10409	6415	2824

Таблица 2 - Результаты испытаний на МЦУ опытных образцов с замковым пазом «ласточкин хвост» из дисков 1-ступени КНД двигателя Д-30КУ-154, материал ВТЗ-1

№ образца	Количество циклов до разрушения		
	Образцы из диска без наработки	Образцы из диска с наработкой при ЭЦИ 9658 циклов	Образцы из диска с наработкой в эксплуатации 17995 час/5545 циклов
1	14629	12909	9666
2	14242	9600	20900
3	10247	–	13344
4	19907	–	–
Среднее количество циклов	14756	11255	14637
Общее среднее количество циклов	14756	$N_{cp} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 N_i = 13284$ циклов	
Среднее количество циклов с учётом предварительной наработки	14756	$N_{cp} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 N_i = 20474$ циклов	

Кроме вышеуказанных, были проведены испытания диска 0 ступени двигателя ГТД-10 РМ на стенде УИР-2, отличающиеся по уровню нагружения. Результаты испытаний дисков приведены в табл. 3. Следует отметить различие типов НС: в круглых образцах одноосное, в образцах с замковым пазом «ласточкин хвост» близкое к плоскому и в зонах концентрации напряжений дисков объёмное,

что повлияло соответственно и на результаты испытаний. Отметим, что тип НС в уравнении Мэнсона не учитывается. Неясен также вопрос – как учитывать предварительную наработку дисков при ЭЦИ или в эксплуатации до начала испытаний на МЦУ, которым предшествовал значительный период вылёживания и "отдыха". В данной работе осуществляли суммирование всех циклов.

Таблица 3 - Результаты испытаний на МЦУ дисков ГТД на стендах УИР-2 и УИР-3

Наименование дисков	Количество циклов до появления трещины в дисках при ЭЦИ						
	1 ступень КНД Д-30КУ-154 с предв. наработкой ~3500 цикл. материал ВТ3-1	0 ступень М70ФРУ без предв. наработки материал ВТ-22	9 и 10 ст. КВД Д-30КУ-154 с предв. наработкой ~4300 циклов материал ЭИ961-Ш	0 ступень ГТД-10 РМ без предв. наработки материал ВТ-6	11 ступень КВД Д-30КУ-154 материал ЭИ961-Ш		
					После 1-й доработки с предв. наработкой ~1370 циклов	После 2-й доработки с предв. наработкой ~2220 циклов	После полной доработки с предв. наработкой ~1370 циклов
1	5874	1710	~17200	9442	2000	2000	>23500
2	7635	–	~17200	–	2000	2000	>23500
Среднее количество циклов	6755	1710	~17200	9442	2000	2000	>23500
Количество циклов с учётом предварительной наработки	10255	1710	~21500	9442	~3400	~4300	>24870

Расчёт малоциклового долговечности

Модифицированное в ЦИАМ уравнение Мэнсона (1) с учётом (2) связывает число циклов до появления трещины N с характеристиками материала и параметрами НДС детали в расчётном цикле. При этом часто результаты расчётов значительно отличаются от экспериментов. Поскольку метод универсальных наклонов представляет общий подход к оценке МЦУ и в настоящее время не существует чётких рекомендаций по определению σ_m , то рассматривались различные варианты представления σ_m через главные напряжения. В процессе расчётов было установлено большое влияние на прогнозируемую МЦУ следующих механических характеристик (по степени влияния): пределов прочности σ_b и длительной прочности $\sigma_{дл}$, коэффициентов относительного сужения ψ и Пуассона μ . Поэтому в расчёт принимались индивидуальные данные из паспорта на соответствующий диск. Из условия обеспечения надёжности и работоспособности деталей при рассеянии механических свойств в расчётах использовались их минимальные значения и учитывались результаты, удовлетворяющие условию безопасности $n = N_{расч.}/N_{экспер.} \leq 1$. Необходимо учитывать также, что появление трещины определялось визуально, но после появления

трещины детали продолжают «работать» до достижения трещиной критической величины. В результате предварительных расчётов с различными выражениями σ_m были установлены три варианта представления σ_m (табл. 4), к которым для сравнения был добавлен четвёртый вариант, соответствующий уточнённому уравнению Мэнсона-Муралидхарана [3]. В выражениях для σ_m индексы "н" и "р" обозначают соответственно напряжения при нагружении и разгрузке. При этом для интенсивности напряжений $\sigma_{ин}$ и $\sigma_{р}$ использовали выражение

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{13})^2}. \quad (3)$$

Таблица 4 - Варианты расчёта МЦУ

№ варианта	Выражения σ_m и уравнения
1	$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)_н / 3$ по [2]
2	$\sigma_m = (\sigma_{ин} + \sigma_{р}) / 2$
3	$\sigma_m = (\sigma_{ин} - \sigma_{р})$
4	уравнение Мэнсона-Муралидхарана [3]

Улучшенное уравнение Мэнсона-Муралидхарана [3] имеет вид

$$\Delta \varepsilon = 1.17 \left[\frac{\sigma_B}{E} \right]^{0.832} N^{-0.09} + 0.0266 D^{0.155} \left[\frac{\sigma_B}{E} \right]^{-0.53} N^{-0.56}, \quad (4)$$

где σ_b – предел прочности,
 $D = \ln(1/(1-\psi))$ – пластичность материала.

При шаговом расчёте НДС в цикле нагружения образцов и дисков в системе ANSYS часто пластические деформации при нагружении и разгрузке получаются одинаковыми, что приводит к нулевым размахам интенсивности пластических деформаций. Поэтому, чтобы не исключать влияние пластических деформаций на малоцикловую долговечность, в соответствии с (2) они учитывались в размахе деформаций полностью. Очевидно, в процессе жёсткого циклического нагружения происходит перераспределение упругой и пластической составляющих размаха деформаций, учесть которое более точно пока нет возможности.

Это, по-видимому, является одной из причин в ряде случаев существенного расхождения результатов расчёта и эксперимента, поскольку уменьшение доли пластической деформации влечёт увеличение доли упругой деформации, участие которых в размахе в соответствии с (2) не пропорционально. Результаты расчётов приведены в табл. 5. Как образцы, так и диски различались по уровню нагружения в цикле, которое можно разделить на уровни с малыми, средними и большими пластическими деформациями. Поэтому для оценки вариантов расчёта условно введена следующая классификация нагружения в зависимости от интенсивности пластических деформаций: малые пластические деформации (МПД) – $\varepsilon_i^p < 0,001$; средние (СПД) – $0,001 \leq \varepsilon_i^p < 0,003$ и большие (БПД) – $\varepsilon_i^p \geq 0,003$.

Таблица 5 - Результаты испытаний и расчётов малоцикловой долговечности образцов и дисков ГТД

Наименование объекта исследований		Интенсивность пластических деформаций $\varepsilon_i^p \cdot 10^{-3}$		$N_{\text{эксп}}$	Величина n отношения циклов до разрушения: $n = N_{\text{расч}} / N_{\text{эксп}}$			
					Варианты расчётов			
					1	2	3	4
Стандартные образцы	$\Delta\varepsilon = 0,008$	МПД	0,154	13830	1,485	0,723	1,275	13,89
	$\Delta\varepsilon = 0,010$	СПД	1,189	10409	0,672	0,349	0,082	2,803
	$\Delta\varepsilon = 0,012$	БПД	3,010	6415	0,546	0,321	0,095	1,298
	$\Delta\varepsilon = 0,014$	БПД	4,976	2824	0,686	0,445	0,159	1,058
Образцы с пазом «ласточкин хвост» из дисков без наработки (верхние) и с предварительной наработкой (нижние результаты)		СПД	1,691	14756	0,140	0,146	0,064	0,945
				20474	0,101	0,105	0,046	0,681
1 ступень КНД Д-30КУ-154 с наработкой ~3500 циклов		МПД	0,107	10255	3,204	3,203	0,387	97,3
0 ступень материал ГТД-10 РМ без предвар. наработки		СПД	1,927	9442	1,875	1,695	0,797	18,4
9 и 10 ст. Д-30КУ-154 с наработкой ~4300 циклов			2,002	21500	0,446	0,421	0,272	3,565
0 ступень М70ФРУ без наработки		БПД	3,920	1710	1,167	1,106	0,730	1,508
11 ступень КВД Д-30КУ-154	После 1-й доработки с наработкой ~1370 циклов		7,512	3380	0,564	0,476	0,738	0,441
	После 2-й доработки с наработкой ~2220 циклов		5,588	4300	0,843	0,574	0,811	0,676

Анализ результатов позволил выделить варианты и области применения уравнения Мэнсона в зависимости от величины ε_i^p при нагружении, которые приведены в табл. 6.

Таблица 6 - Варианты и области применения уравнения Мэнсона

Наименование объекта исследований	Величина интенсивности пластических деформаций ε_i^p		
	МПД	СПД	БПД
Стандартные круглые образцы	2	1	1
Образцы с замком «ласточкин хвост»	–	4	–
Диски ГТД	3	3	3
МПД – $\varepsilon_i^p < 0,001$; БПД – $\varepsilon_i^p \geq 0,003$; СПД – $0,001 \leq \varepsilon_i^p < 0,003$			

Выводы

1. Применение модифицированного уравнения Мэнсона [2] обеспечивает удовлетворительную достоверность только для стандартных круглых образцов при НС, близким к одноосному при средних и

больших пластических деформациях: при $\varepsilon_i^p \geq 0,001$.

2. Уточнённое уравнение Мэнсона-Муралидхарана [3] показало удовлетворительную точность только для образцов с замковым пазом «ласточкин хвост», НС которых близко к плоскому при средних пластических деформациях: $0,001 \leq \varepsilon_i^p < 0,003$.

3. Для всех исследованных дисков, НС которых в области концентраторов напряжений является объёмным, независимо от уровня пластических деформаций наиболее достоверные результаты по прогнозированию МЦУ показал третий вариант, в котором для определения среднего напряжения используется разность (размах) интенсивностей напряжений при нагружении и разгрузке дисков: $\sigma_m = (\sigma_{in} - \sigma_{ip})$.

4. Малоцикловая усталость материала ВТЗ-1 дисков первой КНД двигателя Д-30КУ-154 в радиальном и окружном направлениях практически одинакова.

Библиографический список

1. Manson S.S. Fatigue: A Complex Subject—Some Simple Approximations // *Experimental Mechanics*. 1965. V. 5, no. 7. P. 193-226.

2. Демьянушко И.В., Биргер И.А. Расчёт на прочность вращающихся дисков М.: Машиностроение, 1978. 247 с.

3. Муралидхаран У., Мэнсон С. Модифицированное уравнение с универсальными показателями степени для оценки усталостных характеристик металлов // *Теоретические основы инженерных расчётов*. 1988. № 4. С. 87-92.

4. Портер А.М., Букатый С.А., Округин А.А. Исследование процессов накопления повреждений и разрушения валов и дисков ГТД из материалов ЭИ-961 в зависимости от длительности действия максимальных напряжений в цикле нагружения // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьёва*. 2008. № 2(14). С. 65-74.

5. Кузменко М.Л., Матвеев Г.П., Портер А.М., Букатый С.А. Способ упрочнения деталей. Пат. РФ № 2431687; опубл. 20.10.2011; бюл. № 29.

Информация об авторах

Портер Александр Маркович, кандидат технических наук, начальник отдела «КО Анализа и управления ресурсом», Научно-производственное объединение «Сатурн». E-mail: aleksandr.porter@npo-saturn.ru; alporter@rambler.ru. Область научных интересов: надёжность и

ресурс ГТД, малоцикловая и длительная прочность.

Букатый Станислав Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «ТМиСМ», Рыбинский государственный авиационный технический университет. E-mail: bukaty_sa@mail.ru. Область научных интересов: остаточные

напряжения и деформации, упрочняющие технологии, малоцикловая усталость, механика разрушения.

Лёшин Дмитрий Павлович, инженер-конструктор первой категории «КО

Анализа и управления ресурсом», Научно-производственное объединение «Сатурн». Область научных интересов: надёжность и ресурс ГТД, малоцикловая и длительная прочность.

RESEARCH OF THE VALIDITY OF FORECASTING LOW CYCLE DURABILITY OF GAS TURBINE ENGINE PARTS BASED ON MANSON'S EQUATION

© 2014 A.M. Porter¹, S.A. Bukatyi², D.P. Leshin¹

¹“NPO “Saturn” Corporation, Rybinsk, Russian Federation

²Rybinsk State Aviation Technical University in the name of P.A. Solov'yev, Rybinsk, Russian Federation

The article presents the prediction of low-cycle durability of gas turbine discs and test samples by the method of universal tilt – on the basis of the Manson equation and its various modifications. Manson equation obtained by testing of standard specimens in stretching-compression, i.e. an uniaxial stress state and the symmetric cycle of loading. Under complex stress-strain state in the modification of the equations embeded the mean stress of the cycle, but clear guidance for determining it are missing. In this paper we proposed different ways to imagine the average stress. On the basis of verification of various modifications were adopted, the results of tests of standard specimens with circular cross-sections, samples of the lock "swallow's tail" cut from the disks of the compressor, as well as full-scale drive of new and used. The test was carried out from zero cycle of loading close to the real operating conditions of main parts of the gas turbine engine. By comparison of calculation results with the experimental data revealed the most effective ways to refine the Manson equations. It was found a significant effect on low cycle durability of not only the magnitude of deformation of the parts, but the type of stress-strain state. Therefore, the most effective was the using of the stress intensities. It was also established that the refinement equation, introduced by Manson and Muralidharan applicable only for stress states that are close to flat.

Low-cycle fatigue, equation Manson, samples and gas turbine discs, low-cycle fatigue testing, forecasting of durability, average stress.

References

1. Manson S.S. Fatigue: A Complex Subject-Some Simple Approximations // *Experimental Mechanics*. 1965. V. 5, no. 7. P. 193-226.
2. Demiyanushko I.V., Birger I.A. Raschet na prochnost' vrashchayushchikhsya diskov [The strength calculation of rotating discs]. M.: Mashinostroenie Publ., 1978. 247 p.
3. Muralidharan U., Manson S.S. The modified equation with universal exponents to evaluate the fatigue characteristics of metals // *Journal of engineering for industry. Transactions of the ASME. Series B*. 1988. No. 4. P. 87-92. (In Russ.)
4. Porter A.M., Bukatyi S.A., Okrugin A.A. Study of the processes of damage accumulation and fracture of gas turbine shaft and disc from materials of EI-961 depending on the duration of action of the maximum stress in the cycle of loading // *Vestnik RGATU*. 2008. No. 2(14). P. 65-74. (In Russ.)
5. Kuzmenko M.L., Matveenکو G.P., Porter A.M., Bukatyi S.A. Spособ uprochneniya detalej [The method of parts hardening]. Pat. RF, no. 2431687, 2011. (Publ. 20.10.2011, bull. no. 29).

About the authors

Porter Alexander Markovich, Candidate of Science (Engineering), Chief of Design Department of the Analysis and Management of a Resource "NPO "Saturn" Corporation. E-mail: aleksandr.porter@npo-saturn.ru; alporter@rambler.ru. Area of Research: Gas turbine reliability and durability, low-cycle fatigue and long-term strength.

Bukatyi Stanislav Alekseevich, Doctor of Science (Engineering), Professor of FSEE HPE «Rybinsk State Aviation Tech-

nical University University in the name of P.A. Solovyev». E-mail: [bukaty_sa@mail.ru](mailto:bukatya_sa@mail.ru). Area of Research: Residual stress and strains, strengthening technologies, low-cycle fatigue, fracture mechanics.

Leshin Dmitriy Pavlovich, Chief engineer of the Analysis and Management of a Resource "NPO "Saturn" Corporation. Area of Research: Gas turbine reliability and durability, low-cycle fatigue and long-term strength.