

УДК 621.1.001:621.438:539.431

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

© 2014 С.А. Букатый¹, А.А. Округин²

¹Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва

²Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск Ярославской области

Экспериментальные исследования показывают, что основные детали – валы и диски газотурбинных двигателей, работающие в условиях малоциклового усталости и длительной прочности, имеют долговечность, значительно превышающую ресурс, определяемый расчётным путём на основе гипотезы линейного суммирования повреждений. Следовательно, требуется уточнение расчётных методик, позволяющее полностью использовать резервы прочности деталей. В данной работе проведены исследования влияния на долговечность увеличения длительности отнулевого цикла нагружения образцов с периодом $T = 200$ с и выдержкой на максимальном и минимальном уровнях: $\Delta\tau_{\max} = 120$ с и $\Delta\tau_{\min} = 60$ с. Исследования проводили на стандартных круглых образцах с диаметром рабочего участка 7,5 мм. Показано, что при остановке нагружения в материале протекают релаксационные процессы, сопровождающиеся ростом пластических деформаций и деформационным циклическим упрочнением. При этом установлено, что гипотеза о линейном суммировании статической и циклической составляющих повреждений в условиях малоциклового усталости и длительной прочности не подтверждается. Увеличение в цикле напряжений длительности выдержки под нагрузкой до $\Delta\tau_{\max} = 20$ с и более приводит к значительному росту – до 94 % статической составляющей повреждения. Результаты исследований, полученные при циклическом и повторно-статическом нагружениях, позволили подтвердить и обосновать существование неизвестного ранее «Эффекта циклического упрочнения» материалов, обусловленного длительностью действия максимальных нагрузок в цикле нагружения.

Малоцикловая усталость, длительная прочность, длительность цикла нагружения, напряжённостно-деформированное состояние, эффект циклического упрочнения.

Практика показывает, что экспериментально установленный ресурс валов и дисков компрессора газотурбинных двигателей (ГТД), работающих в условиях малоциклового усталости и длительной прочности, значительно превышает ресурс, определяемый расчётным путём [1, 2, 3]. Следовательно, основные детали – валы и диски – имеют дополнительные резервы прочности, и на взлётном режиме для двигателей можно назначать более высокий по сравнению с расчётным уровень нагрузок. При этом требуется уточнение расчётных методик на основе результатов испытаний на малоцикловую усталость (МЦУ) как стандартных образцов, так и эквивалентно-циклических испытаний (ЭЦИ) натурных деталей. В настоящее время расчёт долговечности деталей выполняют на основе гипотезы линейного суммирования повреждений [4]. Поэтому для проверки данной гипотезы в Научно-производственном объеди-

нении «Сатурн» проведён ряд исследований.

Экспериментальные исследования проводили на стандартных круглых образцах (рис. 1) с диаметром рабочего участка 7,5 мм, с полированной поверхностью из материала ЭП609Ш, используемого для изготовления дисков компрессора высокого давления. Учитывая механические свойства материала при рабочей температуре дисков $\sim 400^\circ\text{C}$ ($\sigma_{\text{пц}} = 600$ МПа, $\sigma_{0,2} = 686$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 743$ МПа), нагружение максимальными напряжениями σ_{max} в цикле было следующим: 600 МПа, 660 МПа, 686 МПа и 712 МПа. На основа-



Рис. 1. Опытные стандартные образцы из сплава ЭП609Ш для испытаний на МЦУ

нии диаграммы типового режима взлёта и выхода на крейсерский полёт двигателя Д30КП в качестве основного был выбран цикл нагружения образцов с периодом $T = 200$ с и выдержкой на максимальном и минимальном уровнях: $\Delta\tau_{\max} = 120$ с и $\Delta\tau_{\min} = 60$ с (рис. 2).

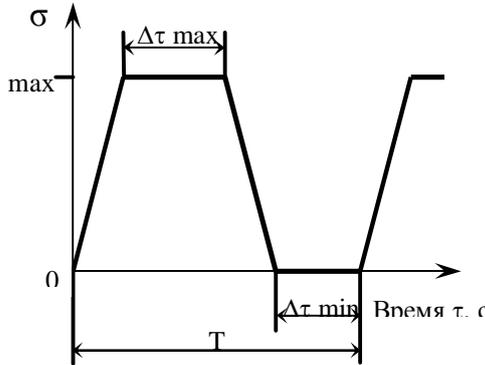


Рис.2. Схема циклов нагружения

Для сравнительных испытаний использовали циклы нагружения, обычно применяемые для испытаний на МЦУ, с выдержками $\Delta\tau_{\max} = \Delta\tau_{\min} = 0,5$ с и общим периодом $T = 2$ с. В работе [2] приведена диаграмма растяжения с перерывами нагружения до 120 с. В смещённой системе координат показано, что при остановке нагружения протекают релаксационные процессы, сопровождающиеся ростом пластических деформаций (рис. 3). Поэтому дополнительно были проведены испытания образцов с выдержками $\Delta\tau_{\max} = \Delta\tau_{\min} = 20$ с при $T = 60$ с.

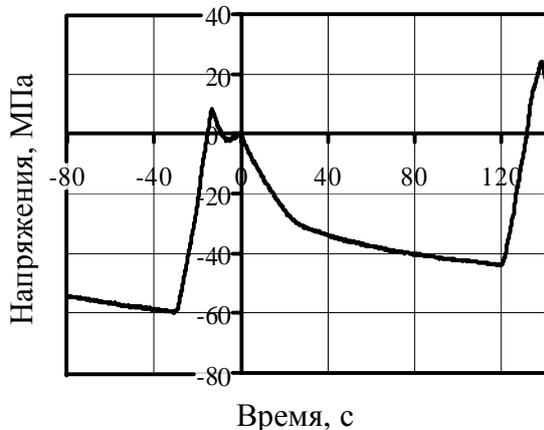


Рис. 3. Диаграмма релаксации напряжений в течение 120 с

Оценку повреждений, накапливающихся в образцах в процессе испытаний на МЦУ и статических испытаний на длительную прочность, осуществляли на основании гипотезы о линейном суммировании статической и циклической составляющих [4]:

$$P_c + P_u = 1. \quad (1)$$

Учитывая, что все циклы на каждом этапе нагружения одинаковы, можно записать:

$$P_c = \sum \frac{t_i}{t_i^*} = \Delta\tau_{\max} \sum \frac{N_i}{t_i^*}, \quad P_u = \sum \frac{N_i}{N_i^*}. \quad (2)$$

Здесь t_i^* – длительность выдержки под напряжением σ_i до разрушения; N_i – число циклов нагружения напряжением $\sigma_i = \sigma_{\max}$; $N_i^* = N_u$ – предельное число циклов нагружения напряжением $\sigma_{\max} = \sigma_i$, определяемое методом универсальных наклонов по модифицированной формуле Мэнсона [4]

$$\Delta\varepsilon = \frac{3.5(\sigma_{dl} - \sigma_m)}{E(t)} \cdot N^{-0.12} + \left(\ln \frac{1}{1 - \psi(t)} \right)^{0.6} \cdot N^{-0.6}, \quad (3)$$

где $\Delta\varepsilon$ – размах деформаций, включающий интенсивность размахов упругих и пластических деформаций за цикл нагружения

$$\Delta\varepsilon = \frac{3}{2(1 + \mu)} \Delta\varepsilon_i^e + \Delta\varepsilon_i^{pl}, \quad (4)$$

σ_{dl} и σ_m – соответственно предел длительной прочности материала и среднее напряжение цикла; $E(t)$ и $\psi(t)$ – модуль упругости и относительное сужение материала дисков.

Интенсивности размахов упругих и пластических деформаций в цикле нагружения определяли по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[\frac{(\Delta\varepsilon_x - \Delta\varepsilon_y)^2 + (\Delta\varepsilon_y - \Delta\varepsilon_z)^2 + (\Delta\varepsilon_z - \Delta\varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2}(\Delta\gamma_{xy}^2 + \Delta\gamma_{yz}^2 + \Delta\gamma_{xz}^2)}{2} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Для определения P_u и расчётного количества циклов N_i^* в соответствии с характеристиками материала при температуре 400°C было принято: $\sigma_{dl} = 700$ МПа, $E(t) = 1,6 \cdot 10^5$ МПа и $\psi(t) = 0,70$. Режимы нагружения образцов,

результаты испытаний и расчёта циклической и статической повреждаемости приведены в табл. 1. В связи с отсутствием кривых Ларсена-Миллера на уровне на-

пряжений 686 и 712 МПа в качестве предельных расчётных приняты величины долговечности, полученные из эксперимента.

Таблица 1 - Результаты исследования циклической и статической повреждаемости стандартных круглых образцов из сплава ЭП609Ш

№ вар. п/п и тип нагружения	Характ-ка нагружения $\Delta\tau_{max} / \Delta\tau_{min}, c$	Количество циклов нагружений и длительность наработки N циклов / τ час				Общая наработка до разрушения $N_{цикл} / \tau$ час	$\Psi, \%$ в шейке образца	Повреждаемость $P_{ц+} P_c = P$
		600 МПа	660 МПа	686 МПа	712 МПа			
1 цикл	120/60	536/16,87	407/13,57	3455/114,16	747/24,89	5145/171,49	68,56	$0,115+20,727 = 20,842$
2 цикл	120/60	-	-	-	60/2,00	60/2,00	71,41	$0,002+1,093 = 1,095$
3 цикл	120/60	-	-	3560/118,64	-	3560/118,64	67,88	$0,083+7,301 = 7,384$
4 повторно-статич.	-	7/30,83	5/25,76	3/11,38	-	15/67,97	71,39	$\sim 0 + 0,891 = 0,891$
5 повторно-статич.	-	-	-	4/16,25	-	4/16,25	71,54	$\sim 0 + 1 = 1$
6 цикл	20/20	-	-	14600/81,11	-	14600/81,11	69,36	$0,339+4,991 = 5,330$
7 цикл	0,5/0,5	-	-	46785/6,56	-	46785/6,56	31,10	$1,085+0,403 = 1,488$
8 статический	-	-	-	-	1/1,83	1/1,83	71,46	$0 + 1 = 1$
Расчётные данные	-	98720/4300	54060/140	43130/16,25	34820/1,83	-	-	-

Анализ полученных результатов

1. Сравнение вариантов 1, 2 и 8 показывает, что предварительное циклирование – "тренировка" при напряжениях, равных пределу пропорциональности и пределу текучести с увеличенными интервалами $\Delta\tau_{max}$ и $\Delta\tau_{min}$, значительно (в ~12 раз) увеличивает не только циклическую, но и статическую долговечность. Эти испытания свидетельствуют о существовании «Эффекта циклического упрочнения» (ЭЦУ), заключающегося в увеличении пластических свойств – относительного сужения Ψ материала (см. варианты 1 и 7) - и увеличении циклической и статической долговечности при напряжениях, существенно превышаю-

щих предел текучести. Во всех указанных вариантах наблюдается квазистатическое разрушение с образованием шейки (рис. 4).



Рис. 4. Образование шейки в образцах при квазистатическом разрушении

2. «Эффект циклического упрочнения» опровергает известное положение о том, что все материалы с отношением $\sigma_b / \sigma_{0,2} < 1,2$ при циклическом деформировании разупрочняются [5]. В рассмот-

ренном случае для ЭП-609Ш $\sigma_b/\sigma_{0,2} = 1,08$.

3. В отличие от ЭЦУ, при повторно-статическом нагружении аналогичное предварительное нагружение приводит к существенному уменьшению долговечности (варианты 4 и 5), что отмечено в работе [6].

4. Вариант 6 показывает, что релаксационные процессы при $\Delta\tau_{\max} = \Delta\tau_{\min} = 20$ с также увеличивают пластические свойства материала и приводят по сравнению со стандартным вариантом 7 к существенному увеличению статической долговечности, но несколько меньшей по сравнению с вариантом 3. Циклическая прочность при этом увеличивается в 4 раза. Это обстоятельство важно учитывать с целью уменьшения длительности и трудоёмкости испытаний при разработке циклов нагружения для проведения эквивалентных циклических испытаний. Вместо $\Delta\tau_{\max} = 120$ с приблизительно те же результаты можно получить при $\Delta\tau_{\max} = 20 - 40$ с.

5. Увеличение длительности циклов нагружения (варианты 1 – 3, 6) при увеличении статической повреждаемости приводит к существенному уменьшению циклической долговечности и повреждаемости по сравнению с расчётной, определяемой по уравнению Мэнсона. Только вариант 7 показывает результаты, близкие к расчётным. Следовательно, уравнение Мэнсона не учитывает длительность циклов нагружения деталей.

6. В вариантах 1, 3, 6 преобладает статическая повреждаемость ($P_c \gg 1$). В варианте 7 преобладает циклическая повреждаемость и полная повреждаемость $P = 1,488 > 1$. Только в вариантах 2 и 4, где $P_c \approx 0$ и преобладает статическая повреждаемость, $P \approx P_c \approx 1$. Полученные результаты совместных испытаний на

циклическую и длительную прочность подтверждают несостоятельность гипотезы о линейном накоплении повреждений.

Выводы

1. Гипотеза о линейном суммировании статической и циклической составляющих повреждений не подтверждается.

2. Статическая и циклическая долговечность деталей при повышенной температуре существенно зависит от длительности действия $\Delta\tau_{\max}$ и $\Delta\tau_{\min}$ соответственно максимальных и минимальных напряжений в цикле нагружения.

3. Предварительное циклическое нагружение – «циклическая тренировка» материала в диапазоне $\sigma_{\text{ци}} < \sigma_{\max} \leq \sigma_{0,2}$ существенно повышает длительную прочность и циклическую долговечность деталей при повышенной температуре в малоцикловой области и $\sigma_{\max} > \sigma_{0,2}$. Это подтверждает существование «Эффекта циклического упрочнения», имеющего большое значение в энергетическом машиностроении.

4. «Эффект циклического упрочнения» сохраняется в области до $\Delta\tau_{\max} = \Delta\tau_{\min} = 20$ с. При дальнейшем уменьшении $\Delta\tau_{\max}$ до 0,5 с наблюдается уменьшение статической прочности при значительном увеличении числа циклов нагружения до разрушения. Поэтому при разработке программ и проведении эквивалентных циклических испытаний на МЦУ необходимо учитывать длительность работы деталей на уровне максимальных нагрузок.

5. Метод универсальных наклонов (модифицированная формула Мэнсона) не учитывает длительность действия максимальных и минимальных напряжений в цикле нагружения. Для определения области применения этого метода требуется проведение дополнительных исследований.

Библиографический список

1. Шереметьев А.В. Прогнозирование циклической долговечности и установление ресурсов основных деталей авиаци-

онных ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. 2005 . № 8. С. 5.

2. Портер А.М., Букатый С.А., Водолагин А.Л. Исследование влияния длительности действия максимальных напряжений в цикле нагружения на малоцикловую усталость и длительную прочность вала ГТД из материала ЭИ961-Ш // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3(19), часть 2. С. 55-63.

3. 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 макси-

мальных напряжений в цикле нагружения // Вестник Рыбинской государственной технологической академии имени П.А. Соловьева. 2008. № 2(14). С. 65-74.

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

5. Роней М. Усталость высокопрочных материалов. В кн.: Разрушение. Т. 3. М.: Мир, 1976. С. 471-527.

6. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение. 1976. 216 с.

Информация об авторах

Букатый Станислав Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва. E-mail: bukatya_sa@mail.ru. Область научных интересов: остаточные напряжения и деформации, упрочняющие технологии, ма-

лоцикловая усталость, механика разрушения.

Округин Александр Александрович, начальник ведущего отдела проекта ПД-14, Научно-производственное объединение «Сатурн». E-mail: aleks.okrugin@mail.ru; alexandr.okrugin@npo-saturn.ru. Область научных интересов: надёжность и ресурс ГТД, малоцикловая и длительная прочность.

STUDY OF CYCLE LIFE OF A MATERIAL IN CONDITIONS OF LOW-CYCLE FATIGUE AND LONG-TERM STRENGTH

© 2014 S.A. Bukatyi¹, A.A. Okrugin²

¹Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation

²“NPO “Saturn” Corporation, Rybinsk, Russian Federation

Experimental studies shows that the main parts - the shaft and the disks of gas turbine engines, working in the conditions of low-cycle fatigue and durability, have a durability far exceeding the resource identified by calculation based on the hypothesis of linear summation of damage. Therefore, further clarification is needed calculation methods, allowing greater use of the reserves of strength parts. The performed research studies the influence on the durability of the increasing duration of zero cycle of loading samples with a period of $T=200$ s. and the restraint at the maximum and minimum levels: $\Delta\tau_{\max}=120$ s. and $\Delta\tau_{\min}=60$ s. The studies were performed on a standard round specimens with the diameter of the working area of 7.5mm. Shown that when you restrain a loading there is in the material proceeds relaxation process, combined with a deforming cyclic hardening and increasing of the plastic deformation. It was found that the hypothesis of a linear summation of static and cyclic components of the damage in the conditions of low-cycle fatigue and long-term strength is not confirmed. The increasing of the restraint in the loading cycle under the load to $\Delta\tau_{\max}=20$ s. or more leads to a significant increase - up to 94 % of the static component of damage. The research results obtained during cyclic and repeated static loading, helped to confirm and substantiate the existence of a previously unknown “Effect of cyclic hardening materials”, due to the duration of the maximum load in the cycle of loading.

Low-cycle fatigue, long toughness, duration of the cycle of loading, low-cycle fatigue testing, intense the deformed state, effect of cyclic consolidation.

References

1. Sheremetiev A.V. Prediction of cyclic durability and the establishment of the resources of the basic parts of aircraft GTE // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2005. No. 8. P. 5. (In Russ.)
2. Porter A.M., Bukatyi S.A., Vodalgina A.L. The research of the influence of the maximal stress duration in the cycle of loading upon the low-cycle fatigue and the long-term strength of the turbine shaft made of the material ЭИ 961-III // *Vestnik of Samara State Aerospace University*. 2009. No. 3(19), part 2. P. 55-63. (In Russ.)
3. 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.)
4. Demiyanyushko I.V., Birger I.A. *Raschet na prochnost' vrashchayushchikhsya diskov* [The strength calculation of rotating discs]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 247 p.
5. Ronay M. *Ustalost' vysokoprochnykh materialov*. V kn.: *Razrushenie* [Fatigue of high-strength materials. In the book: The destruction]. V. 3. Moscow: Mir Publ., 1976. P. 471-527.
6. Kuznetsov N.D., Zeitlin V.I. *Ekvivalentnye ispytaniya gazoturbinykh dvigateley* [Equivalent testing of gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976. 216 p.

About the authors

Stanislav Alekseevich Bukatyi, Doctor of Science (Engineering), Professor of Rybinsk State Aviation Technical University. E-mail: bukaty_sa@mail.ru. Area of Research: Residual stress and strains, strengthening technologies, low-cycle fatigue, fracture mechanics.

Okrugin Alexander Alexandrovich, Head of the PD-14 Project Leading Department "NPO "Saturn" Corporation. E-mail: alexandr.okrugin@npo-saturn.ru; aleks.okrugin@mail.ru. Area of Research: reliability and GTD resource, low-cyclic and long durability.