

УДК 621.452.3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДИСКОВ ГТД ИЗ СПЛАВА ЭИ698-ВД С УЧЕТОМ АСИММЕТРИИ ЦИКЛА НАГРУЖЕНИЯ

Б. Е. ВАСИЛЬЕВ¹, И. И. ПЛЕЩЕЕВ², С. А. ШИБАЕВ³, М. Е. КОЛОТНИКОВ⁴

¹⁻³ bevasilev@ciam.ru, ⁴ mekolotnikov@mail.ru

¹⁻³ ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова» (ЦИАМ)

⁴ Институт механики Московского государственного университета (МГУ)

Поступила в редакцию 28.05.2020

Аннотация. Сопротивление усталости конструкционных материалов деталей зависит от многих технологических и эксплуатационных факторов, в т. ч. от асимметрии цикла нагружения. Для совершенствования способа учета чувствительности материалов к асимметрии цикла нагружения при прогнозировании циклической долговечности деталей ГТД проведены эксперименты, в ходе которых определены характеристики малоциклового усталости сплава ЭИ698-ВД. Испытания проведены при двух температурах (20 и 550° С) и нескольких значениях коэффициента асимметрии по деформации. Найдены соотношения между величиной циклической долговечности и коэффициентом асимметрии.

Ключевые слова: газотурбинные двигатели; малоцикловая усталость; асимметрия цикла нагружения; никелевый сплав; пластичность.

ВВЕДЕНИЕ

Для материалов деталей и узлов авиационных двигателей вследствие характера их работы важной характеристикой является сопротивление малоциклового усталости (МЦУ). Момент зарождения трещины малоциклового усталости можно спрогнозировать по экспериментальным зависимостям амплитуд (или размахов) напряжений (мягкий цикл нагружения) или деформаций (жесткий цикл нагружения) от числа циклов до образования трещины. Исчерпание долговечности в рамках МЦУ происходит вследствие цикличности работы деталей газотурбинных двигателей (ГТД) и сопровождается накоплением пластических деформаций.

Асимметрия цикла обычно характеризуется с использованием коэффициентов асимметрии, определяемых по формулам:

$$R_{\sigma} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, R_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max}},$$

где σ_{\min} , σ_{\max} – минимальное и максимальное напряжения в цикле, ε_{\min} , ε_{\max} – минимальная и максимальная деформации в цикле.

Среднее напряжение (σ_m) определяется по формуле:

$$\sigma_m = 0,5 (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}).$$

Для учета влияния средних напряжений цикла на долговечность обычно переходят к кривым предельных амплитуд. Они представляют собой зависимость амплитуды напряжений от среднего напряжения цикла для заданной долговечности. Существуют различные формулы для аппроксимации данной зависимости, основывающиеся на результатах испытаний при симметричном цикле и при кратковременном статическом нагружении (предела прочности σ_B или предела текучести σ_T), такие как Гудмана [1], Зодерберга [2–3], Герберга для кривой предельных амплитуд [4]:

$$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2 = 1.$$

Для учета асимметрии (R) в англоязычной технической литературе наиболее часто используется формула эквивалентных напряжений (σ_{eq}) Смита – Уотсона – Топпера (SWT) [5, 6]:

$$\sigma_{eq} = \sigma_{\max} \left(\frac{1-R}{2} \right)^{0,5} = \sigma_a \left(\frac{1-R}{2} \right)^{-0,5}.$$

Ее обобщением является формула Уокера, включающая варьируемый показатель степени γ [6, 7]:

$$\sigma_{eq} = \sigma_{\max} \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\gamma} = \sigma_a \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\gamma-1}.$$

Однако все указанные способы в основном применяются для расчета долговечности при многоциклового усталости в условиях упругого деформирования. Влияние асимметрии по деформациям исследовано существенно меньше. Для оценки малоциклового усталости при наличии пластических деформаций зачастую используют формулу Менсона, связывающую размах деформаций с количеством циклов:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c,$$

где $\sigma_f', \varepsilon_f', b, c$ – параметры материала, $\Delta \varepsilon$ – размах деформаций, N_f – количество циклов до образования трещины. Первое слагаемое представляет собой повреждаемость от упругой части деформации, второе слагаемое – от пластической.

Существуют различные способы оценки и подбора коэффициентов усталости материала в формуле Менсона [8]. Наиболее часто в литературе используются следующие параметры [3]:

$$\Delta \varepsilon = \frac{3,5\sigma_B}{E} (N_f)^{-0,12} + \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6} (N_f)^{-0,6},$$

где σ_B – предел прочности, E – модуль упругости, ψ – относительное сужение. Для учета средних напряжений цикла предложено большое количество модификаций формулы Менсона. Формула Морроу [9]:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c.$$

Формула Менсона – Халфорда [10]:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^b +$$

$$+ \varepsilon_f' \left(\frac{\sigma_f' - \sigma_m}{\sigma_f'} \right)^{c/b} (2N_f)^c.$$

Модификация Смита – Уотсона – Топпера:

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \varepsilon_f' \sigma_f' (2N_f)^{b+c}.$$

Биргер предложил следующее уравнение [11]:

$$\Delta \varepsilon = \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6} (N_f)^{-0,6} + \frac{2\sigma_{-1}}{E} \left(\frac{N_0}{N_f} \right)^{\frac{1}{m}} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right).$$

Каждая из предложенных модификаций имеет свои недостатки. Так, при использовании поправки Менсона – Халфорда получается завышенное влияние на долговечность среднего напряжения при высоких размахах деформации [12]. Применение модификации Смита – Уотсона – Топпера приводит к корректным оценкам для больших долговечностей, но при малых – слишком консервативна. Использование формулы Морроу может приводить к неверным оценкам, особенно в области очень низких и высоких долговечностей [12–14].

В работе [14] при изучении циклической усталости образцов из высокопрочной стали АТМ А723 выявлено, что при амплитудах деформации больше 0,5 % влияние коэффициента асимметрии по деформациям незначительно.

Таким образом, задачи исследования поведения материала при различных коэффициентах асимметрии по деформациям и разработки способа учета асимметрии при расчете циклической долговечности деталей ГТД являются актуальными.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ В КРИТИЧЕСКИХ ЗОНАХ ДИСКОВ ТУРБИН

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) дисков турбин. Расчеты проводились для одного цикла нагружения с использованием линейной кинематической модели упрочнения. На рис. 1 для узлов конечно-элементных моделей (КЭМ) типичных дисков турбин приведены соотношения между размахом деформаций и коэффициентом асимметрии. Для облегчения восприятия рисунков результаты в точках КЭМ с размахом деформации меньше 0,3 % не приведены.

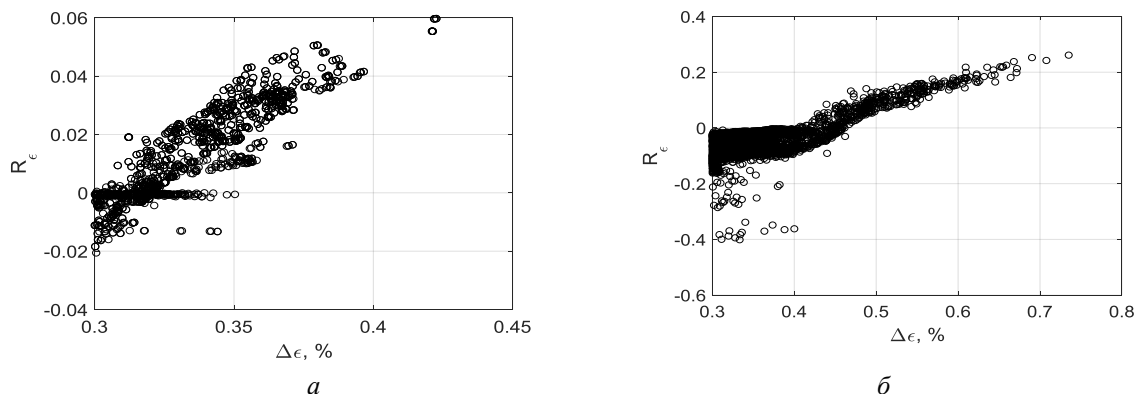


Рис. 1. Соотношение между размахом деформации и коэффициентом асимметрии для разных точек КЭМ: а – диск ТВД; б – диск ТНД

Дополнительно на базе большого числа дисков турбин проанализированы подобные соотношения для критических зон (рис. 2). Две точки с коэффициентом асимметрии $-2,5$ и $-1,0$ соответствуют зонам дна замкового паза для дисков ТНД перспективных гражданских двигателей.

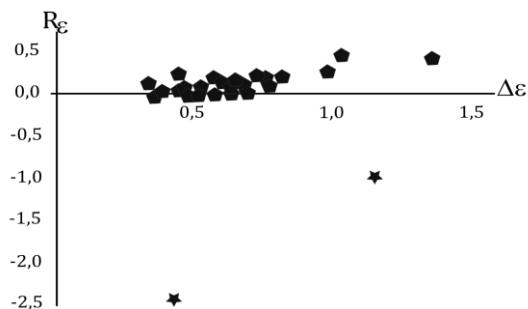


Рис. 2. Соотношение между размахом деформаций и коэффициентом асимметрии

Анализ результатов, приведенных на рис. 1–2, показал, что большинство опасных зон работают в области положительных коэффициентов асимметрии.

Следует отметить, что согласно требованиям РЦ АП33.15-1 [15] характеристики МЦУ должны определяться по результатам испытаний образцов с различными коэффициентами асимметрии R_ϵ ($R_\epsilon = 0; 0,5; -1$) на базах $10^3, 5 \cdot 10^3, 10^4, 5 \cdot 10^4$ (10^5) циклов для каждого уровня температуры и для каждого значения коэффициента асимметрии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках экспериментальных исследований испытаны образцы для МЦУ, изготовленные из «дискового» сплава ЭИ698-ВД. Диаметр рабочей части образцов – 4,37 мм, длина – 13 мм.

Испытания образцов на МЦУ проведены на аттестованной сервогидравлической машине PEZ 4777 (K. Schenck) (рис. 3). Методики проведения испытаний соответствовали требованиям стандартов [16, 17].

Испытания проведены при жестком цикле при температурах 20 и 550 °С, с коэффициентами асимметрии в цикле $R_\epsilon = -\infty; -1,5; -1; 0; 0,5$. Образцы, испытываемые при 550 °С, нагревали в штатных печах электросопротивления. Форма цикла нагружения синусоидальная; частота цикла $f = 0,5$ Гц – для образцов с размахом деформации более 0,6 % и 1 Гц – для образцов с размахом деформации не более 0,6 %. Принято допущение о том, что изменение частоты испытаний в диапазоне 0,5–1 Гц не влияет на результаты эксперимента. Разогрева образцов при данных частотах не происходило.

В результате испытаний образца определялось число циклов до образования трещины N_f и записывались диаграммы деформирования (петли гистерезиса) для каждого цикла нагружения, по которым затем определялись значения напряжений $\sigma(N)_{\max}$ и $\sigma(N)_{\min}$ в цикле с номером $N = N_f/2$. Образование трещины фиксировалось по падению максимальной нагрузки в цикле ниже 10 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 приведены петли гистерезиса, полученные при циклическом деформировании, и их изменения. Рассмотрены петли при размахе деформации $\Delta\epsilon = 1,0$ %, т. к. при размахе 0,6 % явно выраженной петли гистерезиса не наблюдается.

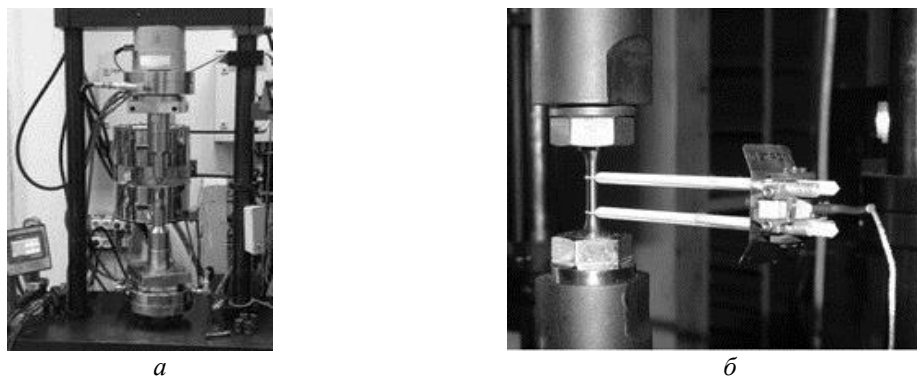


Рис. 3. (а) – испытательная установка PEZ 4777 (К. Schenck); (б) – образец с прикрепленным экстензометром, закрепленный в оснастке машины

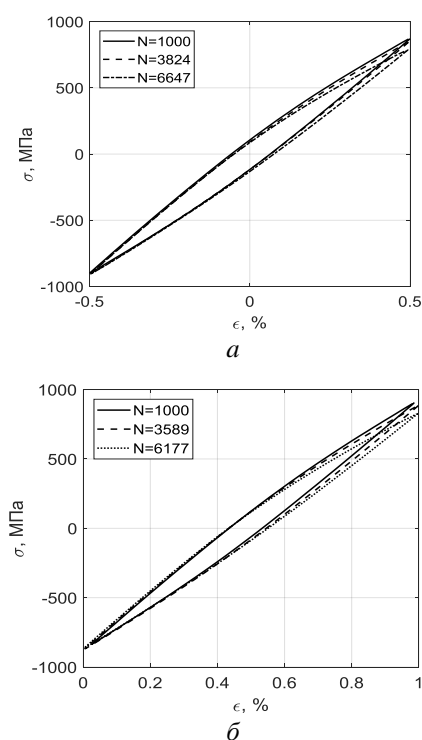


Рис. 4. Циклические петли: а – $\Delta\epsilon = 1,0\%$ и $R_\epsilon = -1,0$; б – $\Delta\epsilon = 1,0\%$ и $R_\epsilon = 0,0$

Анализ результатов, представленных на рис. 4, показал, что для рассматриваемого материала петли гистерезиса стабилизируются примерно к 1000-му циклу. На рис. 5–6 приведены зависимости размахов напряжений и средних напряжений от числа циклов.

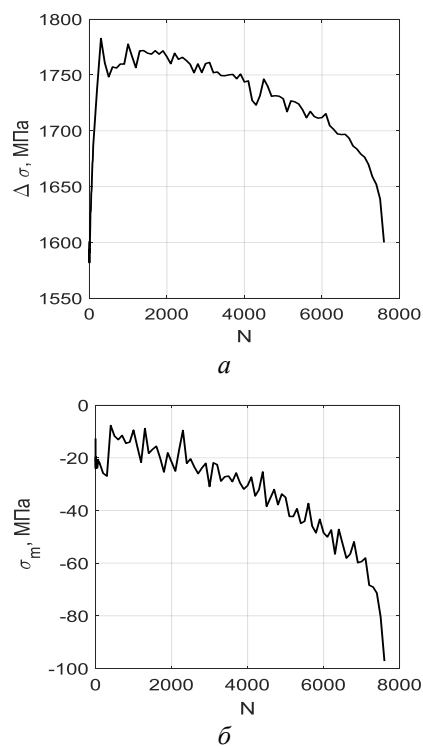


Рис. 5. (а) – размах напряжений в цикле; (б) – среднее напряжение в зависимости от номера цикла $\Delta\epsilon = 1,0\%$ и $R_\epsilon = -1,0$

Анализ результатов, представленных на рис. 5–6, показал, что среднее напряжение для коэффициента асимметрии как для $R_\epsilon = 0,0$, так и для $R_\epsilon = -1,0$ близко к нулю. Сначала петли стабилизируются примерно в первую тысячу циклов. Разупрочнение образца происходит в последние 500–1000 циклов, что проявляется в резком падении максимальных напряжений цикла.

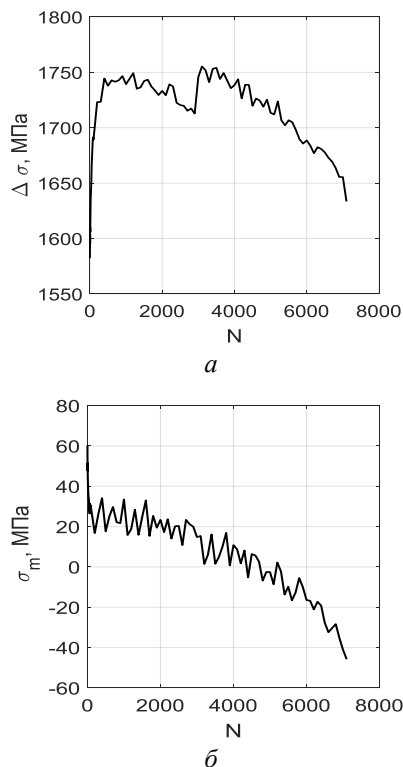


Рис. 6. (а) – размах напряжений в цикле; (б) – среднее напряжение в зависимости от номера цикла $\Delta\epsilon = 1,0\%$ и $R_\epsilon = 0,0$

Для описания установившихся петель использована модель Шабоса с одной кинематической модой. Для подбора параметров модели выбран 3000-ный цикл для симметричного нагружения. Сравнение расчетной и экспериментальной установившейся петли приведено на рис. 7. Показано хорошее совпадение установившихся петель.

Анализ ограниченного объема экспериментальных данных по сопротивлению МЦУ для сплава ЭИ698-ВД показал, что влияние асимметрии по деформации заметно лишь при размахе $\Delta\epsilon = 1,0\%$. Для размаха деформаций $0,6\%$ при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ соотношение между средней величиной циклической долговечности при $R_\epsilon = -1$ и $R_\epsilon = 0,5$ составляет $1,8$, а при температуре $550\text{ }^\circ\text{C}$ данное соотношение составляет $4,8$. Это связано с тем, что при высоких размахах деформаций эволюция НДС в образцах приводит к тому, что средние напряжения цикла стремятся к нулю. На рис. 8 приведены графики зависимости коэффициента асимметрии по напряжениям от коэффициента асимметрии по деформациям при двух размахах деформации (значения взяты для цикла $N = N_f/2$).

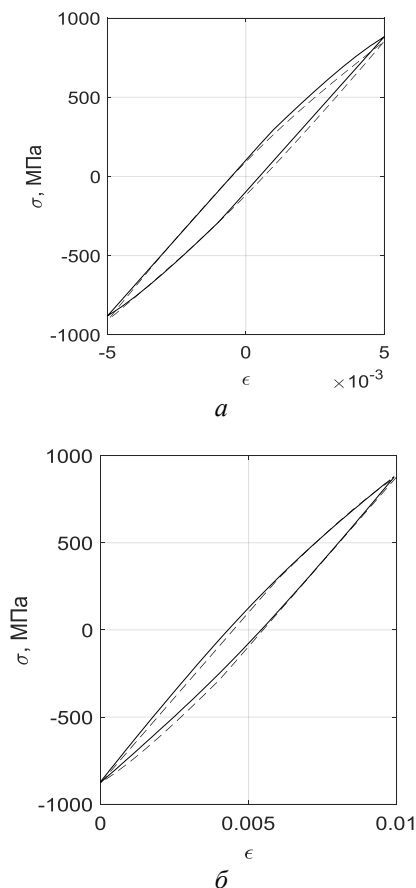


Рис. 7. Сравнение расчетной (--) и экспериментальной петли (-): а – $\Delta\epsilon = 1,0\%$ и $R_\epsilon = -1,0$; б – $\Delta\epsilon = 1,0\%$ и $R_\epsilon = 0,0$

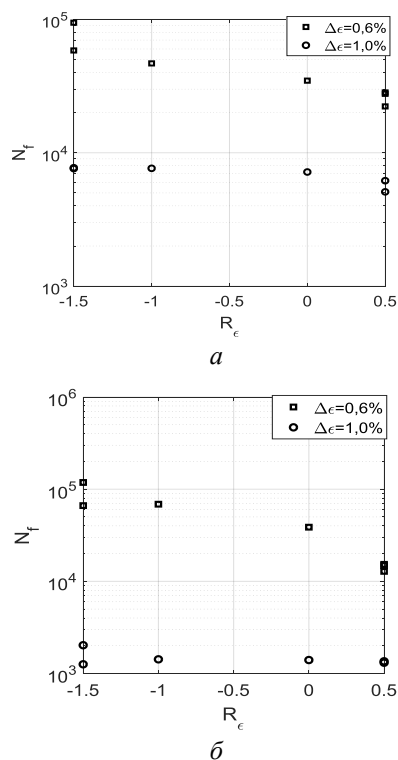


Рис. 8. Влияние степени асимметрии на долговечность материала ЭИ698-ВД при различных температурах: а – $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$; б – $T = 550\text{ }^\circ\text{C}$

На рис. 9 показаны зависимости среднего напряжения от коэффициента асимметрии по деформациям при двух размахов деформации (значения взяты для цикла $N = N_f/2$). Видно, что при больших значениях размаха деформаций величины средних напряжений в цикле меньше.

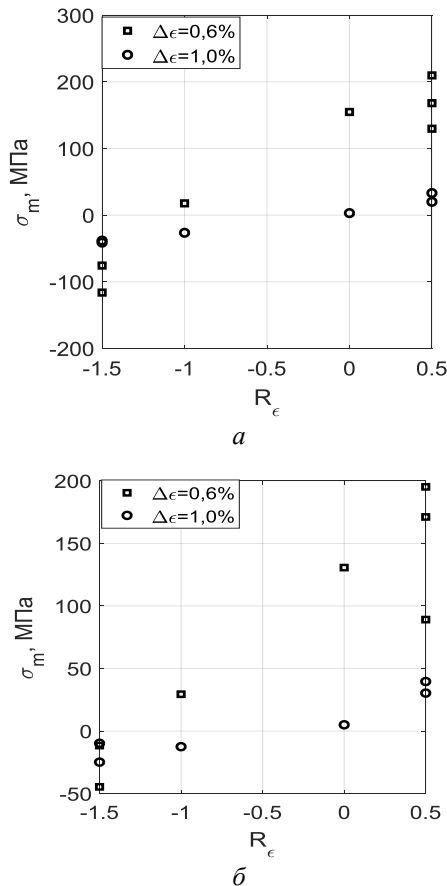


Рис. 9. Зависимость среднего напряжения от коэффициента асимметрии по деформации при различных температурах: $a - T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $б - T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$

Анализ полученных результатов показал, что при низких размахов деформации среднее напряжение заметно зависит от коэффициента асимметрии по деформациям, в то время как при высоких размахов деформаций средние напряжения близки к нулю вне зависимости от асимметрии. Вместе с тем при использовании большинства современных конечно-элементных комплексов оценка средних напряжений в цикле проводится через средние значения упруго-пластических деформаций, что не отражает, как показали эксперименты, физической

кинетики НДС при циклическом деформировании и, следовательно, приводит к неправильным оценкам долговечности.

Для оценки влияния асимметрии цикла на малоцикловую долговечность корректнее использовать коэффициент асимметрии по деформациям R_ϵ , что и сделано в рамках данной статьи.

При использовании степенной зависимости между размахом деформации и количеством циклов до разрушения при постоянном коэффициенте асимметрии имеем:

$$N_f = D(\Delta\epsilon)^n.$$

Это соотношение равносильно линейной интерполяции в координатах $\ln(\Delta\epsilon) - \ln(N_f)$:

$$\ln(N_f) = n \ln(\Delta\epsilon) + C.$$

Для каждого коэффициента асимметрии можно получить различные постоянные C, n . Из рис. 10 видно, что при фиксированном размахе деформации зависимость логарифма долговечности $\ln(N_f)$ от коэффициента асимметрии также возможно аппроксимировать линейно.

Совмещая две аппроксимации, можно получить следующую зависимость между $\ln(\Delta\epsilon) - R_\epsilon - \ln(N_f)$:

$$\ln(N_f) = a_1 \ln(\Delta\epsilon)R_\epsilon + a_2 R_\epsilon + a_3 \ln(\Delta\epsilon) + a_4.$$

Коэффициенты a_i подбираются по методу наименьших квадратов по результатам испытаний на циклическую усталость для размахов $\Delta\epsilon = 0,6; 1,0 \%$ и коэффициентов асимметрии $R_\epsilon = -1; 0; 0,5$. Полученные коэффициенты для температуры $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ приведены в табл. 1. На рис. 10 приведено сопоставление точек, по которым проводился подбор с аппроксимацией.

Таблица 1

Коэффициенты поверхности, подобранные методом наименьших квадратов при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Коэффициент	Значение
a_1	0,3773
a_2	1,5541
a_3	-3,1482
a_4	-5,7096

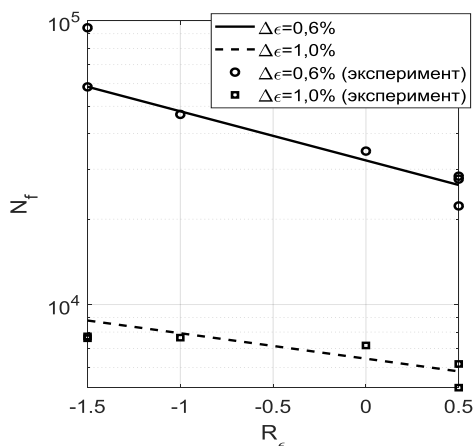


Рис. 10. Зависимость количества циклов до разрушения от коэффициента асимметрии

В пространстве $\ln(\Delta\varepsilon) - R_\varepsilon - \ln(N_f)$ возможно построить трехмерную поверхность, подобную той, что представлена на рис. 11. Следует отметить, что подобная аппроксимация может быть использована только в относительно узких диапазонах значений размаха деформаций (в рассматриваемом случае не более 1,7 %).

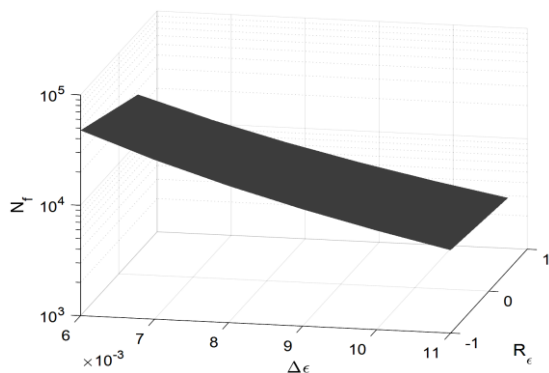


Рис. 11. Зависимость количества циклов до разрушения от коэффициента асимметрии и размаха деформаций при $T = 20^\circ\text{C}$

Для прогнозирования циклической долговечности дисков турбин предлагается подход к учету асимметрии по деформациям, включающий в себя несколько этапов:

- проведение предварительных расчетов НДС дисков и определение диапазонов изменения основных параметров циклического нагружения;
- экспериментальное определение характеристик материала в определенных ранее диапазонах;
- построение аппроксимирующей зависимости количества циклов до разрушения от размаха деформаций и коэффициента

асимметрии и ее использование в уточненных расчетах циклической долговечности;

- учет температурной зависимости в первом приближении может осуществляться с помощью линейной интерполяции.

Для проверки предсказательной силы предлагаемого подхода проведены дополнительные испытания для размаха $\Delta\varepsilon = 0,8\%$ и коэффициента асимметрии $R_\varepsilon = -1; 0; 0,5$. Сопоставление экспериментальных и предсказанных данных приведено на рис. 12.

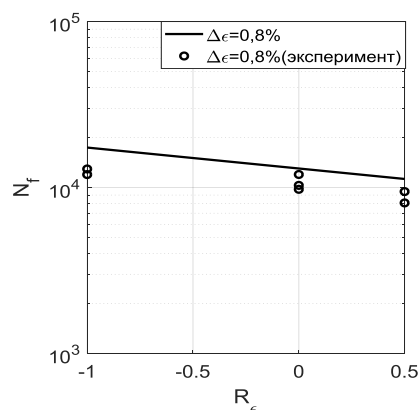


Рис. 12. Зависимость количества циклов до разрушения от коэффициента асимметрии (точками показаны экспериментальные данные)

Из представленных на рис. 12 результатов видно, что при использовании предлагаемого подхода получаются несколько завышенные по сравнению с экспериментом результаты. Однако точность предсказания данного подхода для исследованного материала в указанных диапазонах изменения параметров существенно выше, чем у описываемых в технической литературе зависимостей.

С учетом дороговизны проведения экспериментальных исследований зачастую вопреки требованиям РЦ АП33.15-1 [15] испытания проводят при двух величинах коэффициентов асимметрии $R_\varepsilon = -1$ и $R_\varepsilon = 0$. Однако использование кривых МЦУ, полученных при пульсирующем и симметричном нагружениях, может приводить к неконсервативной оценке циклической долговечности дисков турбин. В табл. 2 приведены экспериментально определенные и предсказанные значения (с использованием экстраполяции по значениям в -1 и 0) циклической долговечности при коэффициенте асимметрии $R_\varepsilon = 0,5$.

Таблица 2

Сопоставление экспериментальных и прогнозируемых значений ($R_\varepsilon = 0,5$)

Размах, %	Температура, °C	$N_{\text{экс}}$	$N_{\text{прогн}}$	Погрешность, %
0,6	20	27677; 28342	29935	7,5; 5,3
1,0	20	5095; 6176	6953	26; 11
0,6	550	14826; 15299; 12832	29040	48; 47; 56
1,0	550	1309; 1357	1388	5,7; 2,2
0,8	20	9448; 8073	13157	8; 38

Приведенные в табл. 2 данные наглядно иллюстрируют, что использование экспериментальных данных, определенных при двух значениях коэффициентов асимметрии ($-1; 0$), при оценке малоциклового долговечности при асимметричном по деформации нагружении с коэффициентом асимметрии $R_\varepsilon = 0,5$ приводит к существенным неконсервативным погрешностям в оценке долговечности $\sim 60\%$ в области малых размахов деформаций ($\Delta\varepsilon = 0,6\%$) и $\sim 30\%$ в области больших размахов деформаций ($\Delta\varepsilon = 1,0\%$). Полученные результаты указывают, что для более точного прогнозирования малоциклового долговечности дисков ГТД обязательно определять характеристики материала и формировать набор расчетных значений, в т. ч. при положительных коэффициентах асимметрии. Данная задача должна выполняться в рамках работ по разработке банка данных по конструкционной прочности материалов [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ кинетики напряженно-деформированного состояния образцов в процессе проведенных малоцикловых испытаний показал, что для сплава ЭИ698-ВД при умеренных размахах деформаций коэффициент асимметрии заметно влияет на среднее напряжение цикла, в то время как при размахе $1,0\%$ среднее напряжение практически не зависит от асимметрии и близко к нулю, вследствие чего циклическая долговечность при различной степени асимметрии

цикла по деформациям изменяется незначительно.

При расчетах прочности деталей турбин предлагается использовать аппроксимацию долговечности от размаха деформаций и коэффициента асимметрии R_ε , которая приводит к более корректным результатам по сравнению с указанными в справочной литературе подходами. Показано, что в дисках турбин большинство зон работают при режиме с коэффициентом асимметрии $R_\varepsilon = 0,0 \dots 0,2$, что говорит о необходимости проведения испытаний образцов на МЦУ при положительных коэффициентах асимметрии R_ε для более корректного прогноза малоциклового усталости по сравнению с использованием результатов испытаний при пульсирующем цикле.

Направлением дальнейших исследований является разработка модели, позволяющей учитывать неизотермичность нагружения и технологическую наследственность.

Авторы выражают благодарность Д. В. Сапронову и А. В. Сальникову за предоставленные результаты расчетов критических мест дисков турбин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goodman J. Mechanics Applied to Engineering, Vol. 1, 9th edition, 1930. Longmans Green and Co., London. [J. Goodman, *Mechanics Applied to Engineering*. London: Longmans Green and Co, 1930.]
2. Soderberg C. R. ASME Transactions 52, 1930, APM-52-2, pp. 13-28. [C. R. Soderberg, "ASME Transactions 52", in *APM 52-2*, pp. 13-28, 1930.]
3. Биргер И. А., Балашов Б. Ф., Дульнев Р. А. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1981. 222 с. [I. A. Birger, B. F. Balashov, R. A. Dulnev, *Strength of materials and gas-turbine engine parts*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1981.]
4. Gerber W. Bestimmung der zulossigen in eisen construcionen, 1874. Z. Bayer Arch. Ing Ver. 6, pp. 101-110. [W. Gerber, "Bestimmung der zulossigen in eisen construcionen", in *Z. Bayer Arch. Ing Ver.*, vol. 6, pp. 101-110, 1874.]
5. Smith K. N., Watson P. and Topper T. H. A stress-strain function for the fatigue of materials, 1970. J. Mater. 5. [K. N. Smith, P. Watson, T. H. Topper, "A stress-strain function for the fatigue of materials", in *J. Mater*, vol. 5, 1970.]
6. Theodore N. High cycle Fatigue. A Mechanics of materials perspective. Elsevier Ltd. 2006, 657 p. [N. Theodore, *High cycle Fatigue. A Mechanics of materials perspective*. Elsevier Ltd., 2006.]

7. **Walker K.** The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum, 1970. In: *Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life*, ASTM STP 462. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 1–14. [K. Walker, “The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum”, in *Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life*, pp. 1-14, 1970.]

8. **Theoretical** estimation to the cyclic strength coefficient and the cyclic strain hardening exponent for metallic materials: Preliminary study / Z. Zhang, et. al. // *J. Mater. Eng. Perform.* 2009. Vol. 18, № 3. P. 245-254. [Z. Zhang, et. al., “Theoretical estimation to the cyclic strength coefficient and the cyclic strain hardening exponent for metallic materials: Preliminary study”, in *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 18, no. 3, pp. 245-254, 2009.]

9. **Socie D. F., Morrow J. D.** Review of contemporary approaches to fatigue damage analysis. In: *Risk and Failure Analysis for Improved Performance and Reliability* (Edited by J. J. Burke & V. Weiss), 1980, Plenum Publication Corp., New York, pp. 141–194. [D. F. Socie, J. D. Morrow, *Review of contemporary approaches to fatigue damage analysis*. New York: Plenum Publication Corp., 1980.]

10. **Manson S. S., Halford G. R.** Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage // *Int. J. of Fracture*. 1981. No. 17. Pp. 169-172. [S. S. Manson, G. R. Halford, “Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage”, in *Int. J. of Fracture*, no. 17, pp. 169-172, 1981.]

11. **Биргер И. А.** Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 640 с. [I. A. Birger, *Strength of machine parts*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1993.]

12. **Ince A., Glinka G.** A modification of Morrow and Smith-Watson-Topper mean stress correction models // *Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures*. 2011. T. 34, № 11. С. 854-867. [A. Ince, G. Glinka, “A modification of Morrow and Smith-Watson-Topper mean stress correction models”, in *Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures*, vol. 34, no. 11, pp. 854-867, 2011.]

13. **Fatemi A., Stephens R. I.** Tensile mean stress effects on uniaxial fatigue behaviour of 1045HR steel. In: *Proceedings of International Conference on Fatigue and Fatigue Thresholds*, 1987 Charlottesville, VA, pp. 537–546. [A. Fatemi, R. I. Stephens, “Tensile mean stress effects on uniaxial fatigue behaviour of 1045HR steel”, in *Proceedings of International Conference on Fatigue and Fatigue Thresholds*, 1987, pp. 537-546.]

14. **Koh S. K., Stephens R. I.** Mean stress effects on low cycle fatigue for a high strength steel // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 1991. Vol. 14. Pp. 413–428. [S. K. Koh, R. I. Stephens, “Mean stress effects on low cycle fatigue for a high strength steel”, in *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 14, pp. 413-428, 1991.]

15. **Рекомендательный циркуляр № РЦ-АП-22.15-1** // Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов. 2013. [Guidelines for determination of mechanical properties of metals (in Russian), 2013.]

16. **ГОСТ 25.502.** Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний ме-

таллов. Методы испытаний на усталость. М.: Изд-во стандартов, 1986. 34 с. [*Strength calculations and tests in engineering. Methods of mechanical test. Methods of fatigue tests*, (in Russian), Federal Standard 25.502, Moscow, Publishing house of standards, 1986.]

17. **ASTM E606.** Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. 2012. [*Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing*, ASTM E606, 2012.]

18. **Банк данных ЦИАМ** по конструкционной прочности материалов / Б. Е. Васильев и др. // *Труды МАИ*. 2017. № 96. [B. E. Vasilyev, et. al., “CIAM database for mechanical properties of metals”, (in Russian), in *Trudi MAI*, no. 96, 2017.]

ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВ Борис Евгеньевич, дипл. инженер (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007), канд. техн. наук, начальник отдела отделения прочности ЦИАМ. Иссл. в области развития методов проектирования и расчета прочности деталей ГТД.

ПЛЕЩЕЕВ Иван Иванович, дипл. «Динамика и прочность машин» (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018), аспирант. Инженер в секторе прочности роторов ГТД. Иссл. в области статической и циклической прочности деталей ГТД.

ШИБАЕВ Сергей Александрович, инж. по испытаниям, дипл. инженер по газотурбинным установкам (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011), начальник сектора. Готовит дис. в области статической и циклической прочности металлических материалов.

КОЛОТНИКОВ Михаил Ефимович, дипл. «Гироскопические приборы и устройства» (МАИ, 1977). Д-р техн. наук по прочности газотурбинных двигателей (СГАУ, 1995). Иссл. в области материалов и прочности деталей энергоустановок.

METADATA

Title: Prediction of cycle fatigue life for gas turbine engine disks made of EI698VD alloy taking into account cycle asymmetry.

Authors: B. E. Vasilyev¹, I. I. Pleshcheev², S. A. Shibaev³, M. E. Kolotnikov⁴

Affiliation:

¹⁻³ Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Russia.

⁴ Moscow State University, Institute of mechanics, Russia.

Email: ¹⁻³bevasilev@ciam.ru, ⁴mekolotnikov@mail.ru

Language: Russian.

Source: *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 2 (88), pp. 3-12, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Cyclic life of gas engine parts depends on various technological and operational factors including cycle asymmetry. Low cycle fatigue tests for EI698VD alloy with various strain ratios under 20 and 550 °C temperature were conducted. Based on experimental results low cycle fatigue model was obtained.

Key words: gas turbine engines; low cycle fatigue; cycle asymmetry; plasticity.

About authors:

VASILYEV, Boris Evgenevich, Phd, Head of department, developing of new methods of engine parts design and calculation of its strength. Engineer (Bauman University, 2007).

PLESHCHEEV, Ivan Ivanovich, Engineer (Bauman University, 2018), Postgrad student. Research in static and cyclic calculations of gas turbine engine parts.

SHIBAEV, Sergey Alexandrovich, Head of team, Testing engineer, Engineer of gas turbine units (Bauman University, 2011).

KOLOTNIKOV, Mihail Efimovich, Dipl. Gyroscopic instruments and devices (Moscow Aviation Institute, 1977), Doctor of Technical Sciences for the strength of Gas turbine Engines (SSU, Samara, 1995). Research in thermal strength of power plant parts.