УДК 539.431

СОПРОТИВЛЕНИЕ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ТИТАНОВЫХ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С УЧЕТОМ АСИММЕТРИИ ЦИКЛА НАГРУЖЕНИЯ

[1]Габов И.Г., [2]Котельников А.Н.

[1]ОАО «Авиадвигатель», Пермь, e-mail: gabov-ig@avid.ru;

[2]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: kotelnikov@avid.ru

Проведены исследования сопротивления многоцикловой усталости материалов деталей газотурбинных двигателей. Исследование проводили при воздействии эксплуатационных факторов нагружения – асимметрии цикла и температуры. Описан подход представления результатов усталостных испытаний при различных асимметриях цикла нагружения в виде единой кривой усталости, выраженной через эквивалентные напряжения. Методами регрессионного анализа получены зависимости для описания влияния среднего напряжения цикла нагружения на усталостную долговечность титановых и никелевых сплавов. Построены диаграммы предельных амплитуд цикла нагружения для титановых и никелевых сплавов при различных асимметриях цикла и температурах. Выполнено сравнение экспериментальных диаграмм предельных амплитуд с уравнениями Гудмана и Зодерберга. Полученные зависимости амплитудных значений пределов выносливости от средних напряжений цикла нагружения могут быть использованы для прогнозирования ресурса многоцикловой усталости деталей газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, титановый сплав, никелевый сплав, многоцикловая усталость, асимметрия цикла нагружения, регрессионная модель

HIGH-CYCLE FATIGUE STRENGTH OF TITANIUM AND NICKEL ALLOYS IN RESPECT OF LOADING – CYCLE ASYMMETRY

[1]Gabov I.G., [2]Kotelnikov A.N.

[1]Aviadvigatel OJSC, Perm, e-mail: gabov-ig@avid.ru;

[2]Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: kotelnikov@avid.ru

This article is concerned with the research of high-cycle fatigue of materials used in gas-turbine engine components. The research has been carried out under the conditions of loading operational factors – asymmetry of loading cycle and temperature. Much attention is paid to the description of a presentation approach to the fatigue tests results at various loading cycle asymmetries. The results are presented in the form of the single fatigue curve expressed through the equivalent stress. Parameters for the description of the mean cycle stress influence on titanium and nickel alloys fatigue lives have been obtained by means of regression analysis. The diagrams of limit cycle amplitudes for titanium and nickel alloys under various temperatures and loading-cycle asymmetries have been designed. Experimental Haigh diagrams have been compared with Goodman and Soderberg fatigue equations. Received fatigue margin peak values vs mean fatigue stress parameters can be used for prediction of the gas-turbine engine components fatigue life.

Keywords: gas turbine engine, titanium alloy, nickel alloy, high-cycle fatigue, loading – cycle asymmetry, regression model

Большое количество отказов газотурбинных двигателей (ГТД) на этапе доводки и эксплуатации связано с усталостными дефектами [4]. Характеристики многоцикловой усталости, которые во многом определяют надежность и долговечность деталей, лежат в основе обеспечения безопасности эксплуатации воздушного судна с ГТД. Сопротивление усталости конструкционных материалов деталей газотурбинных двигателей зависит от многих технологических и эксплуатационных факторов, в т.ч. от асимметрии цикла нагружения (среднего напряжения в цикле) [2, 3, 6].

Цель настоящей работы состоит в получении зависимостей, пригодных для описания влияния асимметрии цикла нагружения или среднего напряжения цикла нагружения на характеристики сопротивления усталости титановых и никелевых сплавов.

Влияние среднего напряжения на характеристики усталости

Данные об усталостном разрушении при воздействии статических нагрузок могут быть получены по результатам усталостных испытаний, проведенных при постоянном среднем напряжении для всей партии образцов или при испытаниях образцов с постоянным значением асимметрии цикла нагружения.

Нагружение при усталостных испытаниях с асимметрией цикла, характеризуется коэффициентом асимметрии цикла $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$. Минимальное σ_{min} и максимальное σ_{max}

напряжения можно определить через комбинацию средних напряжений σ_m и амплитуды σ_a напряжений [1]:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a; \quad (1)$$

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a. \quad (2)$$

Амплитуда σ_a и средние напряжения σ_m цикла связаны с коэффициентом асимметрии следующими зависимостями [1]:

$$\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2 = \sigma_{max}\cdot(1 - R)/2; \quad (3)$$

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2 = \sigma_{max}\cdot(1 + R)/2. \quad (4)$$

Известно несколько способов представления зависимости предела выносливости от средних напряжений в цикле. Наиболее полно и просто представление о зависимости предела выносливости материала при асимметричном цикле дают диаграммы предельных амплитуд цикла нагружения [1, 2].

Диаграмма предельных амплитуд цикла – зависимость амплитуды напряжений σ_a от среднего напряжения цикла σ_m для определенной (заданной) долговечности N. В практике инженерного анализа принято использовать следующие формы диаграммы предельных амплитуд: параболу Гербера, прямую Гудмана и прямую Зодерберга [1, 4]. В первом случае значения предела прочности при растяжении $\sigma_в$ и предела выносливости при симметричном нагружении σ_{-1} соединены параболической зависимостью. Прямая Гудмана представляет собой линейную зависимость, также проходящую через значения предела прочности при растяжении $\sigma_в$ и предела выносливости при симметричном нагружении σ_{-1}. Для материалов деталей ГТД, эксплуатируемых при повышенных температурах, обычно используют модифицированную зависимость Гудмана, где вместо предела прочности при растяжении $\sigma_в$ следует брать предел длительной прочности $\sigma_{дл}$. Прямая Зодерберга в отличие от линии Гудмана пересекает ось средних напряжений в значении предела текучести материала $\sigma_т$. Для сравнения свойств различных материалов и анализа влияния различных факторов на сопротивление усталости материалов при асимметричном нагружении используют диаграммы предельных амплитуд в относительных координатах: $\sigma_m/\sigma_в$ и σ_a/σ_{-1}.

Другим подходом к описанию зависимости сопротивления усталости материалов от среднего напряжения в цикле нагружения является использование соотношений, предложенных Smith, Watson, Topper (SWT) или Walker [7]. Уравнение SWT определяет переход от результатов усталостных испытаний при различных асимметриях цикла нагружения R к эквивалентным напряжениям:

$$\sigma_{eq} = \sigma_{max}\cdot((1 - R)/2)^{0,5}, \quad (5)$$

где σ_{eq} – эквивалентные напряжения.

При $R = -1$ эквивалентные напряжения σ_{eq}, определяемые по формуле (5), равны максимальным σ_{max} при данном цикле нагружения. Результаты испытаний при других асимметриях цикла нагружения приводятся к симметричному циклу. Для уравнения SWT коэффициенты приведения составляют 0,5 для цикла с $R = 0,5$ и 0,707 для цикла с $R = 0$.

Лучшее, по сравнению с выражением (5), соответствие экспериментальным данным показывает зависимость Уокера (Walker) [7]:

$$\sigma_{eq} = \sigma_{max}\cdot((1 - R)/2)^{\gamma}. \quad (6)$$

Как видно из сопоставления выражений (5) и (6), отличием уравнений SWT и Уокера является параметр γ, определяемый по результатам усталостных испытаний.

Материалы и методы исследования

Объектом исследований являлись образцы из различных материалов, применяемых для изготовления деталей газотурбинных двигателей (табл. 1).

Определение характеристик сопротивления МнЦУ при нормальной и повышенной температурах выполнено на пропорциональных цилиндрических образцах с плавным сопряжением головок (корсетные образцы) и цилиндрических образцах с концентраторами напряжений – V-образной кольцевой выточкой.

На конечном этапе изготовления корсетные образцы подвергались шлифовке и полировке в осевом направлении до выведения поперечных рисок, видимых при 20^x увеличении. V-образный концентратор напряжений в образце выполнен точением при помощи резца специальной формы за один проход.

Таблица 1

Исследуемые материалы и условия испытаний

Материал	Полуфабрикат	K_t	Условия испытаний	
			T, °C	R
ВТ25У	Поковка диска	1,0	550	–1; 0; 0,5
ВТ6	Пруток	3,35	20	–1; 0; 0,5
ЭИ698-ВД	Поковка вала	1,0	20, 500	–1; 0; 0,5
ЭП718-ИД	Кольцо раскатное	1,0	20	–1; 0; 0,5

Испытания образцов из титановых и никелевых сплавов при нормальной и повышенной температурах на сопротивление МнЦУ проведены на установках резонансного типа Testronic-50 швейцарской фирмы «RUMUL», позволяющих испытывать образцы в условиях симметричного и асимметричного растяжения-сжатия. Нагрев образцов осуществлялся высокотемпературной печью тип STE-12 H. Резонансная испытательная машина Testronic-50 представляет собой механическую колебательную систему, состоящую из подпружиненных масс. Образец также является упругой частью системы. Испытания образцов проведены при частотах колебаний $f = 120…140$ Гц. В процессе испытаний на образцах задавалась статическая составляющая (среднее) напряжения σ_m, далее прикладывались напряжения, меняющиеся по синусоиде с амплитудой σ_a.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты испытаний на усталость при различных асимметриях цикла нагружения образцов из сплавов ВТ25У, ВТ6, ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД представлены на рис. 1.

Кривые усталости представлены в графическом и аналитическом видах. Графические кривые усталости изображены в полулогарифмических координатах ($\lg\sigma_{max} - \lg N$) для каждого коэффициента асимметрии цикла нагружения R. Для аналитического описания единой для разных асимметрий циклов нагружения кривой усталости материалов использовано уравнение Вейбулла [5] в эквивалентных напряжениях:

$$\lg N = A1 + A2 \cdot \lg(\sigma_{eq} - A4); \quad (7)$$

$$\sigma_{eq} = \sigma_{max} \cdot ((1 - R)/2)^{A3},$$

где N – циклическая долговечность образцов; A1, A2 – коэффициенты; A4 – предел «неограниченной» выносливости материала, выраженный в эквивалентных напряжениях, $\sigma_{eq} > A4$; A3 – параметр выражения Уокера γ для эквивалентных напряжений.

Адекватность принятой модели усталостной долговечности оценивалась по результатам корреляционного и регрессионного анализа и анализа остатков регрессии ε_i:

$$\varepsilon_i = \lg N_i - \lg N_{ср}, \quad (8)$$

где $\lg N_i$ – значение логарифма долговечности, определенной по результатам испытаний i-го образца (опытные значения); $\lg N_{ср}$ – значение логарифма усталостной долговечности, определенное по уравнению регрессии (предсказанные значения).

При поиске наилучшей регрессионной модели руководствовались следующими требованиями:

– регрессионная модель должна объяснять не менее 80 % вариации значений логарифма долговечности, т.е. коэффициент детерминации R^2 должен быть $R^2 \geq 0{,}8$;

– остатки регрессии ε_i не должны иметь значимой автокорреляции ($r < 0{,}5$ – связь слабая, $r < 0{,}3$ – связь отсутствует [5]);

– сумма остатков регрессии равна нулю (отличие от нуля в третьем знаке после запятой);

– остатки регрессии нормально распределены (удовлетворяют критерию Шапиро – Уилка [5] для уровня значимости $\alpha = 0{,}05$). Результаты анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты регрессионного анализа данных усталостных испытаний при трех режимах асимметрии цикла нагружения $R = -1$; 0; 0,5

Материал	T, °C	Коэффициенты уравнения	R^2	r	$\lvert\Sigma\varepsilon_i\rvert$	W ($W_{кр}$, $\alpha = 0{,}05$)
ВТ25У	550	A1, A2 A3 = 0 A4 = 0,43	0,88	0,02	0,0017	0,924 (0,901)
ВТ6	20	A1, A2 A3 = 158 A4 = 0,565	0,92	0,32	0,00001	0,966 (0,874)
ЭИ698-ВД	20	A1, A2 A3 = 369 A4 = 0,39	0,93	0,20	0,0004	0,927 (0,897)
	500	A1, A2 A3 = 224 A4 = 0,7	0,93	0,15	0,0007	0,977 (0,897)
ЭП718-ИД	20	A1, A2 A3 = 334 A4 = 0,46	0,79≈0,8	0,13	0,0009	0,976 (0,918)

Принятые модели усталостной долговечности хорошо описывают экспериментальные данные усталостных испытаний при трех асимметриях цикла нагружения $R = -1$; 0; 0,5. Для всех исследуемых сплавов коэффициент детерминации выше или равен минимальному значению $R^2 \geq 0{,}8$ (минимальное значение $R^2 = 0{,}8$ отмечено у регрессионной модели, описывающей результаты испытаний на усталость образцов из сплава ЭП718-ИД). Остатки регрессии без значимой автокорреляции (для моделей усталостной долговечности сплавов ВТ6 и ЭИ698-ВД (при $T = 20$°C) наблюдается слабая автокорреляционная связь, для сплавов ВТ25У, ЭИ698-ВД (при $T = 500$°C) и ЭП718-ИД связь отсутствует), нормально распределены (табл. 2) и без систематической составляющей.

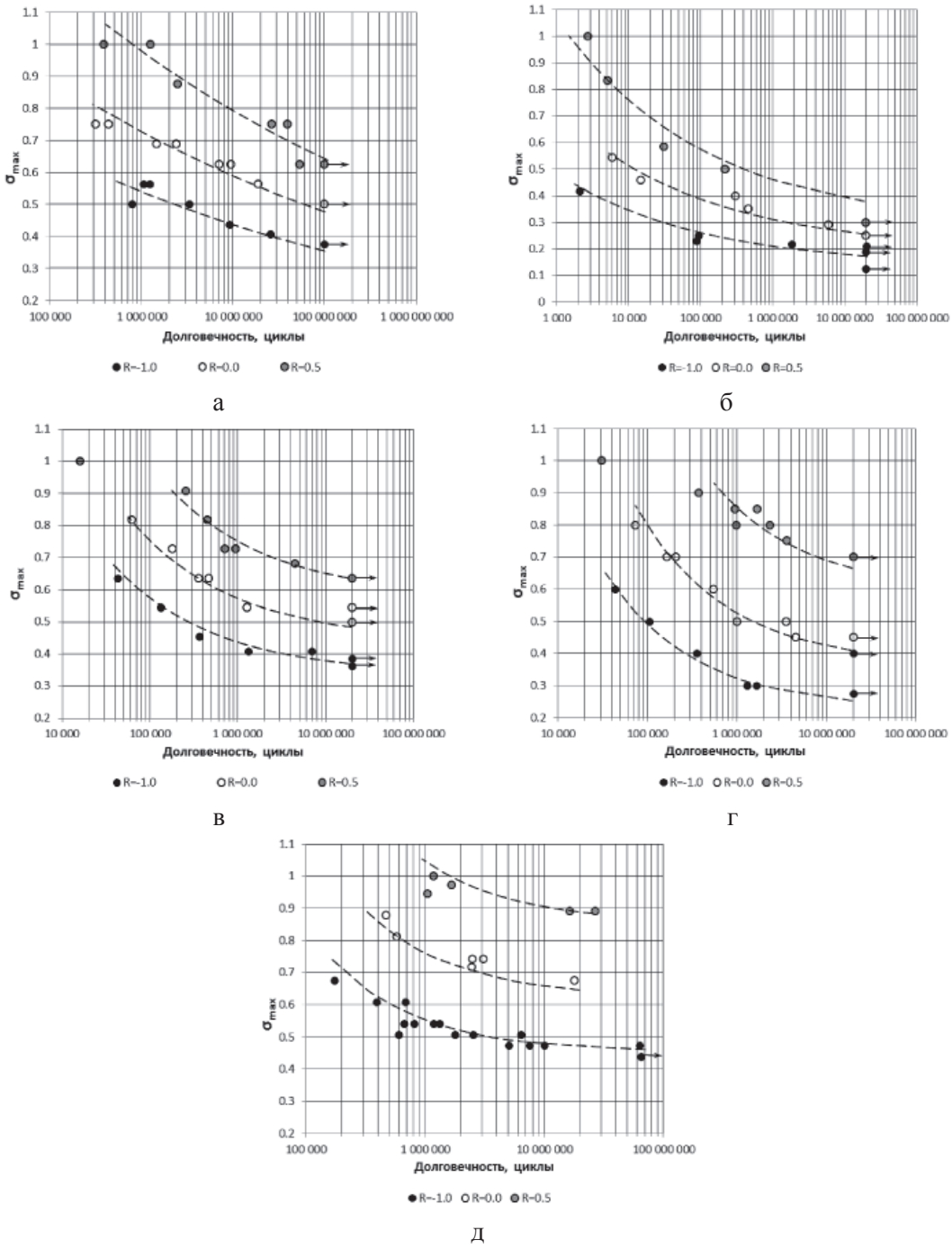

Рис. 1. Кривые усталости при различных коэффициентах асимметрии цикла исследуемых сплавов: а – ВТ25У (T = 550°C); б – ВТ6 (K_t = 3,35, T = 20°C); в – ЭИ698-ВД (T = 20°C); г – ЭИ698-ВД (T = 500°C); д – ЭП718-ИД (T = 20°C). Стрелкой отмечены неразрушившиеся образцы

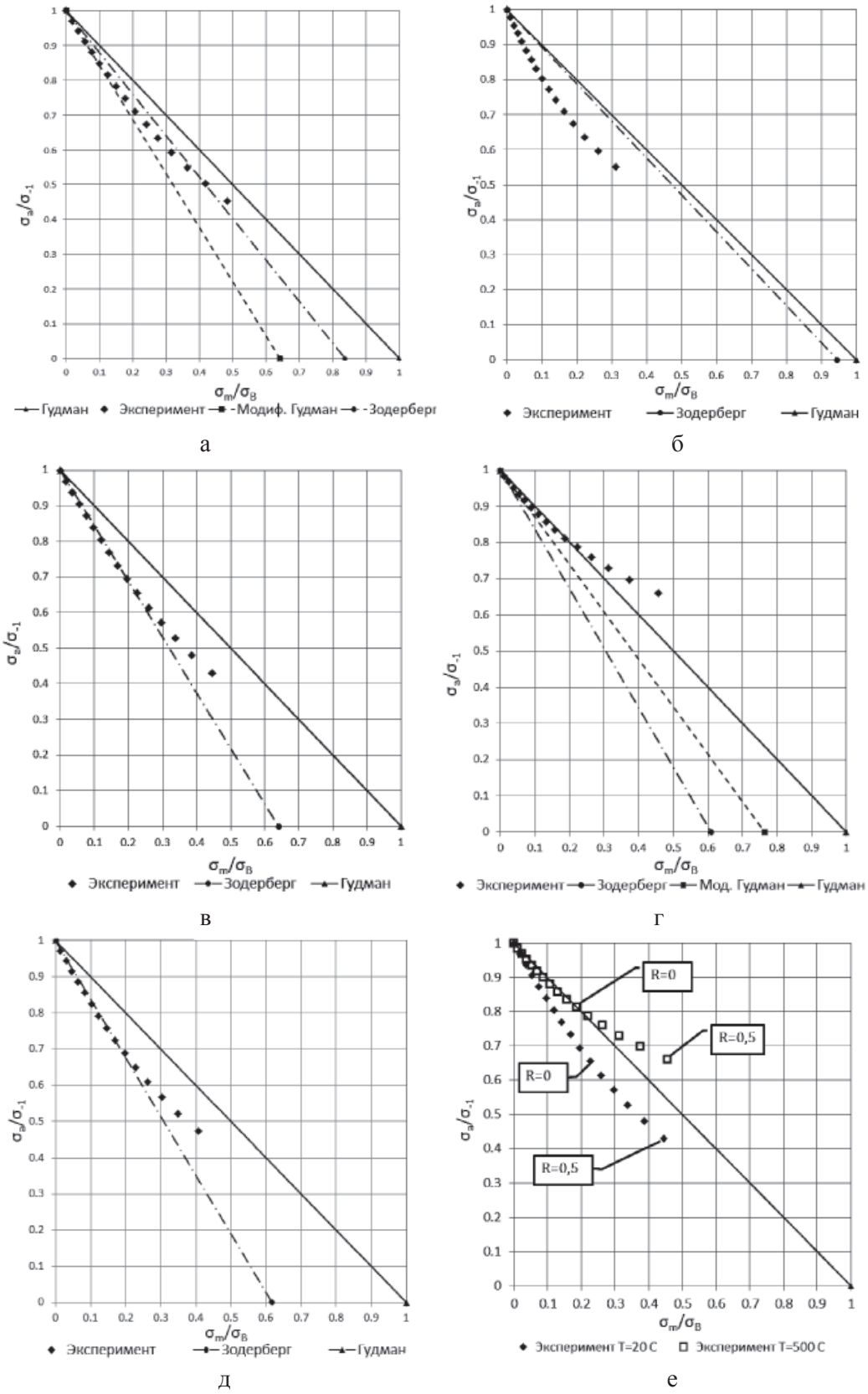

Рис. 2. Диаграммы предельных амплитуд исследуемых сплавов:
а – ВТ25У (Т = 550 °С); б – ВТ6 (K_t = 3,35, Т = 20 °С); в – ЭИ698-ВД (Т = 20 °С);
г – ЭИ698-ВД (Т = 500 °С); д – ЭП718-ИД (Т = 20 °С);
е – влияние температуры на чувствительность коэффициента асимметрии сплава ЭИ698-ВД

При определении минимальных значений пределов выносливости материалов, например по квантильным кривым усталости, следует учитывать зависимость характеристик рассеяния сопротивления усталости от уровня напряжений, для оценки же средних значений пределов выносливости пренебрежение данным фактом не внесет значительных погрешностей в результаты расчетов [5].

Следует отметить следующие особенности кривых усталости исследуемых сплавов. Для описания зависимости усталостной долговечности от уровня напряжений материалов ВТ6, ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД в диапазоне долговечностей до $N = 20…50$ млн циклов приемлемо использование уравнения Вейбулла [5] с «неограниченным» пределом выносливости. Для титанового сплава ВТ25У кривая усталости в диапазоне исследуемых долговечностей $N = 0,3…100$ млн циклов описывается линейной зависимостью в координатах $\lg N - \lg\sigma_{max}$, без перегибов кривой.

Параметр Уокера γ (А4 в (7) и табл. 2) для исследуемых сплавов лежит в достаточно широком диапазоне от $\gamma = 0,3$ до $\gamma = 0,7$. Значения $\gamma < 0,5$ (при $\gamma = 0,5$ эквивалентные напряжения, определяемые по соотношению Уокера, соответствуют напряжениям SWT) получены для титанового сплава ВТ25У при испытаниях при температуре $T = 550$ °С и никелевых сплавов ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД при испытаниях при комнатной температуре. Значения $\gamma > 0,5$ получены для титанового сплава ВТ6 на образцах с кольцевой выточкой ($K_t = 3,35$, температура испытаний $T = 20$ °С) и никелевого сплава ЭИ698-ВД (температура испытаний $T = 500$ °С).

По результатам усталостных испытаний исследуемых сплавов построены диаграммы предельных амплитуд цикла нагружения в относительных координатах (рис. 2). На диаграммы с экспериментальными данными нанесены линии Зодерберга и Гудмана (классические и модифицированные).

Сравнение результатов экспериментальных исследований влияния средних напряжений на сопротивление усталости материалов деталей газотурбинного двигателя и зависимостей Гудмана и Зодерберга показало следующее:

– экспериментальные данные для сплава ВТ6 ($K_t = 3,35$, температура испытаний $T = 20$ °С) расположены ниже кривых Зодерберга и Гудмана во всем исследуемом диапазоне асимметрии цикла нагружения $R = –1…0,5$;

– для никелевых сплавов ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД экспериментальная диаграмма предельных амплитуд при отрицательных значениях коэффициента асимметрии цикла нагружения $R = –1…0$ практически совпадает с линией Зодерберга. При положительной асимметрии цикла нагружения экспериментальные точки лежат выше линии Зодерберга, но ниже линии Гудмана;

– результаты испытаний титанового сплава ВТ25У и никелевого сплава ЭИ698-ВД при повышенных температурах (при $T = 550$ и 500 °С соответственно) расположены выше линии, соответствующей модифицированному уравнению Гудмана. Для титанового сплава ВТ25У экспериментальная точка при $R = 0,5$ расположена выше линии Зодерберга. Для сплава ЭИ698-ВД при значениях коэффициента асимметрии цикла нагружения $R = –1…–0,6$ зависимость предела выносливости от средних напряжений практически совпадает с линией Зодерберга, а при положительных асимметриях $R = 0,1…0,5$ лежит выше линии Гудмана.

На рис. 2 представлены диаграммы предельных амплитуд цикла нагружения сплава ЭИ698-ВД при испытаниях при температурах $T = 20$ и 500 °С (е). Следует отметить меньшую чувствительность сплава ЭИ698-ВД к асимметрии цикла нагружения при повышенной температуре $T = 500$ °С.

Заключение

Полученные зависимости пределов выносливости от средних напряжений цикла нагружения представляют практический интерес для оценки запасов по сопротивлению усталости деталей ГТД и могут быть использованы для прогнозирования ресурса многоцикловой усталости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 02.G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Список литературы

1. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / под ред. А.П. Гусенкова; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993 (III). 364 с.: ил. – (Б-ка расчетчика / ред. кол.: В.А. Светлецкий (пред.) и др.).

2. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей / И.А. Биргер, Б.Ф. Балашов, Р.А. Дульнев и др.; под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Балашова. – М.: Машиностроение, 1981. – 222 с., ил.

3. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Конев И.П., Семенова И.В., Плотников Ю.И., Сараева Л.В. Снижение усталостной прочности лопаток компрессора ГТД при повреждении посторонними предметами // Авиационная промышленность. – 2008. – № 1. – С. 21–24.

4. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.: ил.

5. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

6. Nikhamkin M.S., Voronov L.V., Semenova I.V. Foreign object damage and fatigue strength loss in compressor blades. – Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008. – Berlin, 2008. – P. 245–251.

7. Theodore Nicholas. High Cycle Fatigue. A Mechanics of Materials Perspective. – Elsevier Ltd., 2006.

References

1. Kogaev V.P. Raschety na prochnost pri naprjazhenijah, peremennyh vo vremeni / Pod red. A.P. Gusenkova; 2-e izd., pererab. i dop. [Strength calculations for time-variable fatigue stresses]. Moscow: Mashinostroenie, 1993 (III). 364 p. (B-ka raschetchika / Red. kol.: V.A. Svetleckij).

2. Konstrukcionnaya prochnost materialov i detaley gazoturbinnyh dvigateley / I.A. Birger, B.F. Balashev, R.A. Dulnev and others; under the editorship of I.A. Birger and B.F. Balashev. [Structural strength of gas turbine materials and details] Moscow: Mashinostroenie, 1981. 222 p.

3. Nikhamkin M.S., Voronov L.V., Konev I.P., Semenova I.V., Plotnikov Yu.I., Saraeva L.V. Snijenie ustalostnoy prochnosty lopatoc compressora pri povrejdeniii postoronnimi predmetami. [Fatigue strength loss of compressor blades under foreign object damage.] Aviacionnaya promislennost [Aviation industry], 2008. no. 1. pp. 21–24.

4. Petuhov A.N. Soprotivlenie ustalosti detaley GTD. [Fatigue resistance of details gas turbine engine] Moscow: Mashinostroenie, 1993. 240 p.

5. Stepnov M.N. Statisticheskie metody obrabotki rezultatov mehanicheskih ispytanij: Spravochnik. [Statistical methods for processing the results of mechanical tests]. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 232 p.

6. Nikhamkin M.S., Voronov L.V., Semenova I.V. Foreign object damage and fatigue strength loss in compressor blades. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008. Berlin, 2008. pp. 245–251.

7. Theodore Nicholas. High Cycle Fatigue. A Mechanics of Materials Perspective. Elsevier Ltd., 2006.

Рецензенты:

Бульбович Р.В., д.т.н., профессор, декан аэрокосмического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь;

Нихамкин М.Ш., д.т.н., профессор кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь.