

Вариант модели Уокера для построения кривой малоциклового усталости с асимметрией жесткого цикла нагружения

Серветник А.Н.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва
e-mail: anservetnik@ciam.ru

Предложен вариант модели Уокера для построения кривой малоциклового усталости с асимметрией жесткого нагружения. Модель представляет собой функцию, зависящую от размаха деформаций цикла и коэффициента асимметрии по деформациям, контролируемых при испытании стандартных цилиндрических образцов на малоцикловую усталость. Выполнена оценка качества модели на основе обработки результатов испытаний образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V ELI и никелевого сплава ЭИ698-ВД при жестком нагружении. Предложенная модель сопоставлена с моделью Уокера, учитывающей асимметрию мягкого нагружения.

Ключевые слова: кривая малоциклового усталости, модель Уокера, асимметрия жесткого нагружения

A modified Walker model for constructing a low cycle fatigue curve with mean strain effect

Servetnik A.N.

CIAM, Moscow

A modified Walker model for constructing LCF curve with mean strain effect is proposed. The model is a function that depends on the strain range and the strain ratio controlled during LCF testing of smooth bars. Approbation and evaluation of the model quality was carried out based on processing the results of strain-life fatigue tests of bars from titanium alloy Ti-6Al-4V ELI and nickel alloy EI698VD. The proposed model is compared with Walker's model, which takes into account mean stress effect.

Keywords: low cycle fatigue curve, Walker model, mean strain effect

Введение

Оценка циклической долговечности детали, подверженной высоким повторно-статическим нагрузкам, используется практически на всех этапах жизненного цикла изделия. Появление трещин и разрушение детали в этом случае обычно происходит при числе циклов нагружения $\sim 10^3 \dots 10^5$ (разрушение при малоциклового усталости (МЦУ)) и сопровождается упругопластическим деформированием в зонах концентрации напряжений (жесткое нагружение) [1]. При этом нагружение может быть асимметричным по напряжениям и/или деформациям.

Известно, что асимметрия цикла нагружения является одним из факторов, влияющих на усталость. Для расчетной оценки циклической долговечности в высоконагруженной зоне детали используют характеристики

МЦУ материалов, полученные в аналогичных или более тяжелых условиях испытаний. Принято связывать жесткое нагружение критической зоны детали в рабочих условиях с жестким нагружением образца материала при испытаниях, т.е. в условиях контроля деформаций цикла (ε).

Цикл деформаций (по аналогии с циклом напряжений) характеризуется максимальной (ε_{\max}) и минимальной (ε_{\min}) деформацией цикла либо размахом деформаций $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ и средней деформацией цикла $\varepsilon_m = (\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min})/2$ (рис. 1). Коэффициентом асимметрии цикла деформаций называют отношение минимальной деформации цикла к максимальной ($R_\varepsilon = \varepsilon_{\min}/\varepsilon_{\max}$).

Взаимосвязь между циклической долговечностью и параметрами цикла деформаций устанавливают экспериментальным путем на основании серии испы-

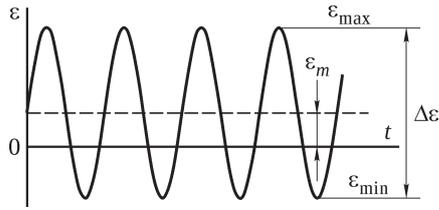


Рис. 1. Параметры цикла деформаций

таний стандартных образцов при разных значениях размаха деформаций ($\Delta\varepsilon$) и коэффициента асимметрии цикла деформаций (R_ε). По результатам испытаний с использованием регрессионного анализа строятся кривые МЦУ при разных R_ε . Наиболее распространена степенная зависимость размаха деформаций цикла от числа циклов до разрушения N_f (соотношение Коффина – Мэнсона) [2]:

$$\Delta\varepsilon = AN_f^b \text{ или} \quad (1)$$

$$\lg N_f = -\frac{1}{b} \lg A + \frac{1}{b} \lg \Delta\varepsilon, \quad (2)$$

где A и b – константы материала.

В случае если коэффициенты асимметрии цикла деформаций детали в рабочих условиях нагружения и образца при испытаниях не равны друг другу, то кривая МЦУ с нужной асимметрией цикла может быть получена на основе модели единой кривой МЦУ, представляющей собой функцию связи числа циклов до разрушения, размаха деформаций и коэффициента асимметрии цикла деформаций.

Модели единой кривой усталости Уокера

Первые модели единой кривой усталости были построены на основе диаграмм предельных напряжений, предложенных Дж. Гудманом [3, с. 631–636], К. Смитом, П. Уотсоном и Т. Топпером [4], К. Уокером [5] и др. Модификация моделей для конструкционных материалов представлена в работах Т. Николаса [6], Н. Даулинга [7; 8], Ш. Лу [9] и других авторов [10–17].

Широкое применение нашла модель Уокера [5], где в уравнение кривой усталости вместо одного параметра цикла напряжений подставляется эквивалентное напряжение, зависящее от двух параметров, $\sigma_w = f(\sigma_{\max}, \sigma_a)$ либо $\sigma_w = f(\sigma_{\max}, \Delta\sigma)$. При мягком цикле нагружения степенная модель имеет вид

$$\sigma_w = AN_f^b; \quad (3a)$$

$$\sigma_w = \sigma_{\max}^{1-w} \sigma_a^w = \sigma_{\max} \left(\frac{1-R_\sigma}{2} \right)^w = \sigma_a \left(\frac{2}{1-R_\sigma} \right)^{1-w} \quad (3б)$$

$$\text{либо } \sigma_w = \sigma_{\max}^{1-w} \Delta\sigma^w = \sigma_{\max} (1-R_\sigma)^w = \Delta\sigma \left(\frac{1}{1-R_\sigma} \right)^{1-w}, \quad (3в)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение цикла; $\sigma_a = \Delta\sigma/2$ – амплитуда напряжений; $\Delta\sigma$ – размах напряжений; w – константа, определяющая чувствительность материала к асимметрии цикла; $R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ – коэффициент асимметрии цикла напряжений.

При определении констант материала A , b и w уравнений (3) в регрессионный анализ включаются результаты испытаний, полученные при двух или более значениях коэффициента асимметрии цикла, поэтому модели кривых усталости типа модели Уокера позволяют достовернее описать поведение материала в широком диапазоне варьирования коэффициента R_σ [6–9]. Модели кривых усталости типа моделей Гудмана [3] и Смита – Уотсона – Топпера [4] могут уступать первым по точности, так как в регрессионный анализ включаются только результаты испытаний при симметричном цикле нагружения ($R_\sigma = -1$).

Иногда уравнения (3) представляют через эквивалентные деформации (ε_w), выполняя деление обеих частей соотношения (3в) на модуль упругости (E) [6; 18]:

$$\varepsilon_w = \frac{\sigma_w}{E} = \left(\frac{\sigma_{\max}}{E} \right)^{1-w} \left(\frac{\Delta\sigma}{E} \right)^w = \frac{\sigma_{\max}}{E} \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{\max}} \right)^w. \quad (4)$$

Следует отметить, что эквивалентные напряжения (σ_w) или деформации (ε_w) Уокера являются условными величинами, не имеющими физического смысла. В некоторой литературе введенный эквивалент называют параметром повреждения [10]. Их введение удобно лишь для представления математической модели.

Модель единой кривой усталости для описания результатов испытаний при жестком нагружении для степенной модели представлена в стандарте [19] в следующем виде:

$$\varepsilon_w = AN_f^b = (\Delta\varepsilon)^w \left(\frac{\sigma_{\max}}{E} \right)^{1-w}; \quad (5)$$

$$\lg N_f = -\frac{1}{b} \lg A + \frac{w}{b} \lg \Delta\varepsilon + \frac{1-w}{b} \lg \left(\frac{\sigma_{\max}}{E} \right). \quad (6)$$

Модель (5) является функцией, зависящей от размаха деформаций и максимального напряжения цикла, и получена из соотношения (4) заменой $\Delta\sigma/E$ на $\Delta\varepsilon$. Выполненный переход от мягкого к жесткому циклу нагружения не является корректным в области неупругого деформирования, однако соотношение (5) представляется в простом и удобном для расчетов виде. При жестком цикле нагружения σ_{\max} может изменяться в зависимости от наработки, поэтому в соотношении (5) подставляют максимальное напряжение, соответствующее циклу со стабилизированной петлей гистерезиса либо циклу $N_f/2$. Модуль упругости в (4) и (5) определяется непосредственно из испытания образца на МЦУ по первой ветке петли гистерезиса [19].

Предложенная модель

Рассмотренные выше модели (3)–(5) не учитывают асимметрию цикла деформаций. Представим модель Уокера в виде функции, зависящей от двух контролируемых при испытании параметров – размаха деформаций цикла и коэффициента асимметрии цикла деформаций:

$$\Delta\varepsilon = f(\Delta\varepsilon, R_\varepsilon). \quad (7)$$

По аналогии с (3в) можем записать:

$$\varepsilon_w = \varepsilon_{\max}^{1-w_\varepsilon} \Delta\varepsilon^{w_\varepsilon} = \varepsilon_{\max} (1 - R_\varepsilon)^{w_\varepsilon} = \Delta\varepsilon \left(\frac{1}{1 - R_\varepsilon} \right)^{1-w_\varepsilon}, \quad (8)$$

где w_ε – константа, определяющая чувствительность материала к асимметрии цикла деформаций.

Для степенной модели (1) и зависимости (8) имеем

$$\varepsilon_w = AN_f^b = \Delta\varepsilon \left(\frac{1}{1 - R_\varepsilon} \right)^{1-w_\varepsilon}; \quad (9)$$

$$\lg N_f = -\frac{1}{b} \lg A + \frac{1}{b} \lg \Delta\varepsilon + \frac{1-w_\varepsilon}{b} \lg \left(\frac{1}{1 - R_\varepsilon} \right). \quad (10)$$

Ограничением использования предложенной модели следует считать условия чистого сжатия, когда $\varepsilon_{\max} \leq 0$. Константы материала в уравнениях (6) и (10) определяются с помощью двухфакторного линейного регрессионного анализа. Предложенное соотношение (8) может быть также использовано для представления кривой МЦУ в экспоненциальной или полиномиальной формах, в форме уравнения Вейбулла [20] и др. Границами применимости модели является тот диапазон долговечностей, в котором выполняется построение модели.

Оценка качества модели

Сплав Ti-6Al-4V ELI. Для оценки качества предложенной модели (9) и сравнения ее с моделью Уокера в форме (5) были использованы результаты испытаний на МЦУ гладких образцов титанового сплава Ti-6Al-4V ELI [15; 21]. Испытания выполнены по стандарту ASTM E606 [22] при жестком нагружении, нормальной температуре и нескольких значениях коэффициента асимметрии: $R_\varepsilon = -1; -0,5; 0; 0,5$. Построение моделей выполнялось в диапазоне долговечностей $\sim 10^3 \dots 10^5$. В табл. 1 и на рис. 2 представлены исходные данные, используемые для анализа. Для модели (5) максимальное напряжение цикла $\sigma_{\max} = \sigma_{\max}(N_f/2)$.

При определении констант материала для моделей (5) и (9) в регрессионном анализе использовались экспериментальные точки при всех вышеуказанных значениях коэффициента асимметрии. Зависимости $\varepsilon_w - \lg N_f$ представлены на рис. 3. Экспериментальные и расчетные значения N_f сопоставлены на рис. 4. Для

Табл. 1. Результаты испытаний образцов из сплава Ti-6Al-4V ELI [15]

R_ε	$\Delta\varepsilon$, мм/мм	σ_{\max} , МПа	E , ГПа	N_f , циклы
-1	0,024	711	107	1 101
	0,024	723	108	1 168
	0,024	728	105	1 582
	0,02	741	107	1 880
	0,02	698	105	1 993
	0,02	728	105	2 270
	0,016	677	106	6 457
	0,016	690	108	7 169
	0,014	759	106	24 587
	0,014	761	106	24 906
	0,012	678	108	62 476
	0,012	644	105	64 025
-0,5	0,012	663	105	103 805
	0,018	777	106	5 258
	0,018	779	107	5 773
	0,015	792	106	11 350
	0,015	803	107	11 496
	0,012	827	106	64 124
0	0,02	778	107	2 732
	0,02	779	105	3 362
	0,016	849	103	5 699
	0,016	761	105	6 996
	0,012	831	105	28 646
	0,012	838	106	32 736
0,5	0,009	906	105	32 033
	0,009	864	107	49 394
	0,008	922	106	64 961
	0,008	883	105	115 442

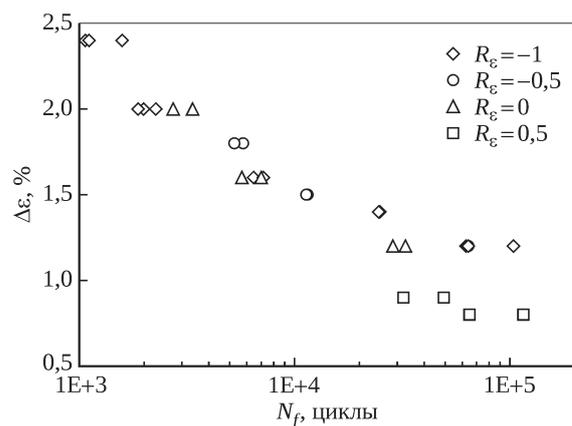


Рис. 2. Результаты испытаний образцов из сплава Ti-6Al-4V ELI в координатах $\Delta\varepsilon - \lg N_f$

оценки качества моделей на графики нанесены полосы (границы отмечены штриховыми линиями), характеризующие погрешность расчета 100%. Для обеих моделей практически все точки (за исключением одной) лежат внутри полосы. Параметры модели Уокера и статисти-

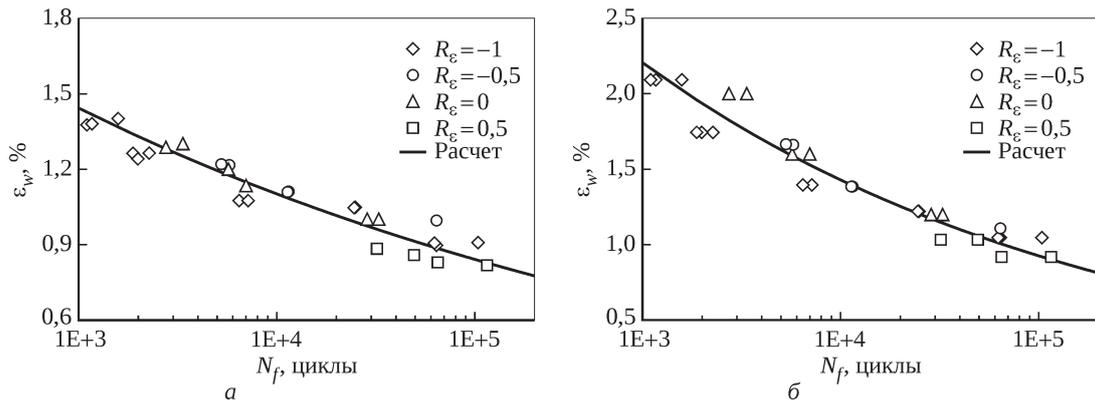


Рис. 3. Зависимости $\varepsilon_w - \lg N_f$ для сплава Ti-6Al-4V ELI, построенные при всех R_ε :
а – модель Уокера (5); б – предложенная модель (9)

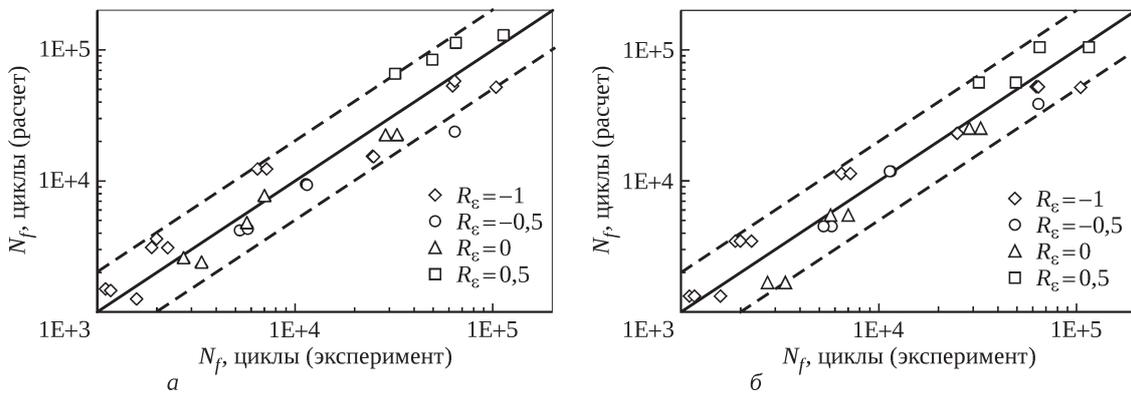


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений N_f для сплава Ti-6Al-4V ELI:
а – модель Уокера (5); б – предложенная модель (9)

Табл. 2. Параметры моделей для сплава Ti-6Al-4V ELI

Модель	w	$S(\lg N_f)$	R^2
Модель Уокера (5)	0,57	0,20	0,91
Предложенная модель (9)	0,80	0,17	0,93

ческие характеристики моделей в виде среднеквадратического отклонения логарифма расчетной долговечности $S(\lg N_f)$ (при допущении о равномерности дисперсии) и коэффициента детерминации R^2 сведены в табл. 2. Для обеих моделей $S(\lg N_f) \leq 0,20$ и $R^2 > 0,90$, что позво-

ляет считать качество представленных регрессионных моделей высоким.

На практике принято выполнять построение модели Уокера при двух значениях коэффициента асимметрии цикла. На рис. 5 и рис. 6 показаны результаты применения модели (9), построенной при $R_\varepsilon = -1; 0$ и при $R_\varepsilon = -1; 0,5$. Использование экспериментальных данных в обработке при $R_\varepsilon = -1; 0$ не дает консервативную оценку долговечности для асимметрии цикла $R_\varepsilon = 0,5$, поэтому экстраполяция модели является нежелатель-

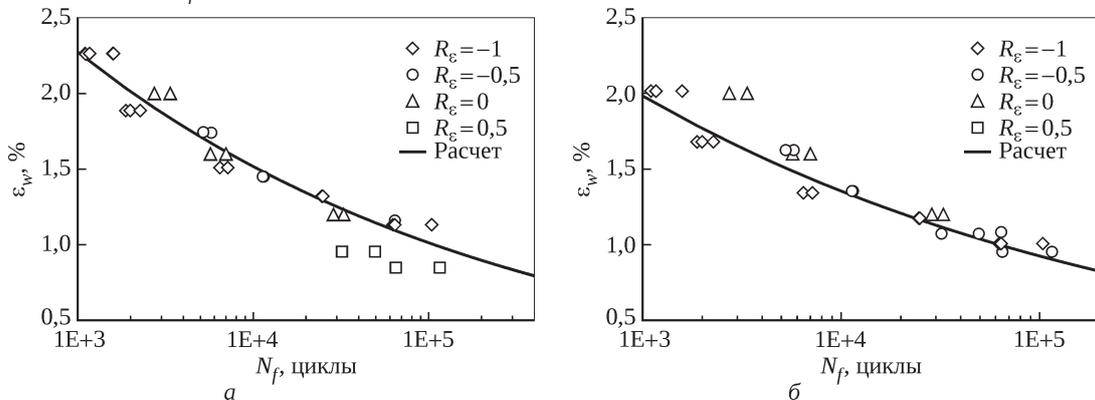


Рис. 5. Зависимости $\varepsilon_w - \lg N_f$ для сплава Ti-6Al-4V ELI, построенные по предложенной модели (9):
а – $R_\varepsilon = -1; 0$; б – $R_\varepsilon = -1; 0,5$

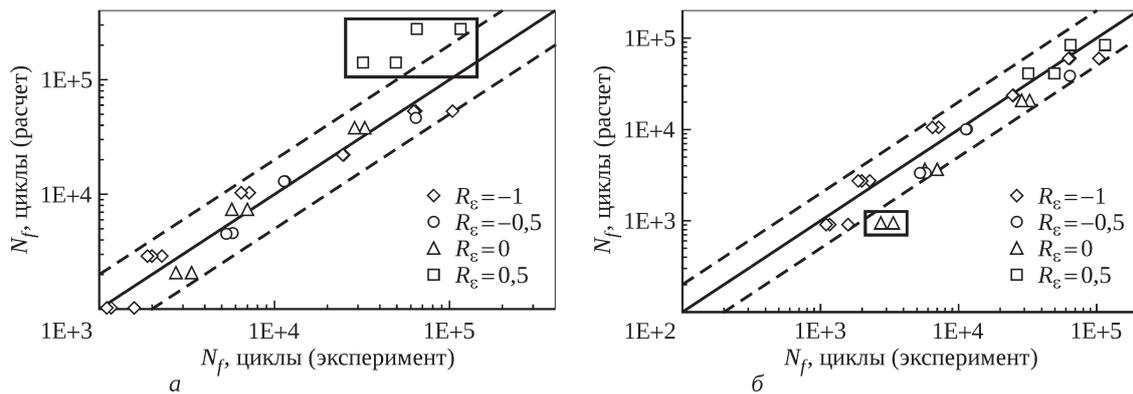


Рис. 6. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений N_f для сплава Ti-6Al-4V ELI по предложенной модели (9): а – $R_e = -1; 0; 0,5$; б – $R_e = -1; 0,5$

ной. И наоборот, результаты эксперимента в обработке при $R_e = -1; 0,5$ могут давать консервативную оценку долговечности для отнулевого цикла нагружения с $R_e = 0$, поэтому применять интерполяцию внутри диапазона $R_e = -1 \dots 0,5$ следует с осторожностью, учитывая качество модели.

Сплав ЭИ698-ВД. Оценка качества предложенной модели была выполнена также для никелевого сплава ЭИ698-ВД на основании обработки результатов испытаний на МЦУ гладких образцов [23]. Испытания выполнены по стандарту ASTM E606 [22] при жестком нагружении, температурах 20 и 550°C и разных значениях коэффициента асимметрии. В табл. 3 и на рис. 7 представлены исходные данные, используемые для анализа. Для модели (5) $\sigma_{\max} = \sigma_{\max}(N_f/2)$.

Результаты моделирования представлены на рис. 8 и рис. 9 в виде зависимостей $\varepsilon_w - \lg N_f$. Параметры

моделей сведены в табл. 4. Для всех рассмотренных случаев $S(\lg N_f) \leq 0,20$ и $R^2 > 0,90$, что позволяет считать качество представленных регрессионных моделей высоким.

Заключение

Предложен вариант модели Уокера для построения единой кривой малоциклового усталости материала с асимметрией жесткого нагружения. Модель представляет собой функцию, зависящую от двух контролируемых при испытании параметров: размаха деформаций цикла и коэффициента асимметрии цикла деформаций. Выполнена оценка качества модели на основе обработки результатов испытаний гладких образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V ELI и никелевого сплава ЭИ698-ВД на малоцикловую усталость при жестком нагружении.

Табл. 3. Результаты испытаний образцов из сплава ЭИ698-ВД [23]

R_e	$\Delta\varepsilon$, мм/мм	σ_{\max} , МПа	E , ГПа	N_f , циклы	$\Delta\varepsilon$, мм/мм	σ_{\max} , МПа	E , ГПа	N_f , циклы
$T = 20^\circ\text{C}$				$T = 550^\circ\text{C}$				
-1,5	0,006	511	215	94 497	0,006	583	200	118 295
	0,01	841	215	7 608	0,01	802	200	1 259
	0,006	571	219	58 497	0,006	544	190	66 347
	0,01	815	215	7 726	0,01	758	190	2 028
-1	0,006	659	219	46 783	0,01	798	192	1 425
	0,01	846	214	7 646	0,006	592	193	68 723
0	0,01	879	215	7 177	0,006	709	193	38 699
	0,006	783	217	34 739	–	–	–	–
0,5	0,006	769	218	27 677	0,006	666	200	14 826
	0,01	890	217	6 176	0,006	731	193	15 299
	0,006	757	214	28 342	0,01	811	193	1 309
	0,01	892	217	5 095	0,006	746	190	12 832
	0,008	852	215	9 448	0,01	808	193	1 357
	0,0045	711	219	62 517	0,008	773	190	4 276
	0,0045	741	219	36 333	0,008	754	190	3 622
	0,0045	844	219	36 197	0,0045	665	190	79 847
	0,006	828	219	22 265	0,0045	677	190	77 782
	0,008	865	219	8 073	–	–	–	–

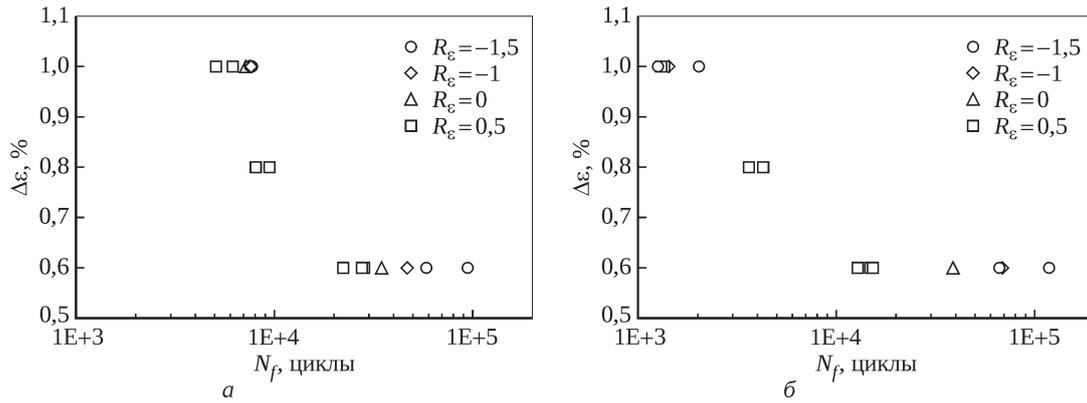


Рис. 7. Результаты испытаний образцов из сплава ЭИ698-ВД в координатах $\Delta\varepsilon - \lg N_f$:
 а – $T = 20^\circ\text{C}$; б – $T = 550^\circ\text{C}$

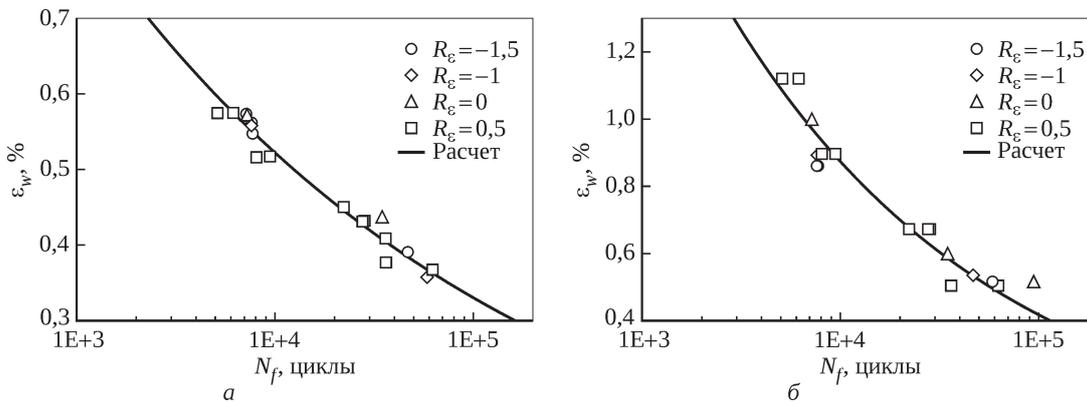


Рис. 8. Зависимости $\varepsilon_w - \lg N_f$ для сплава ЭИ698-ВД при 20°C :
 а – модель Уокера (5); б – предложенная модель (9)

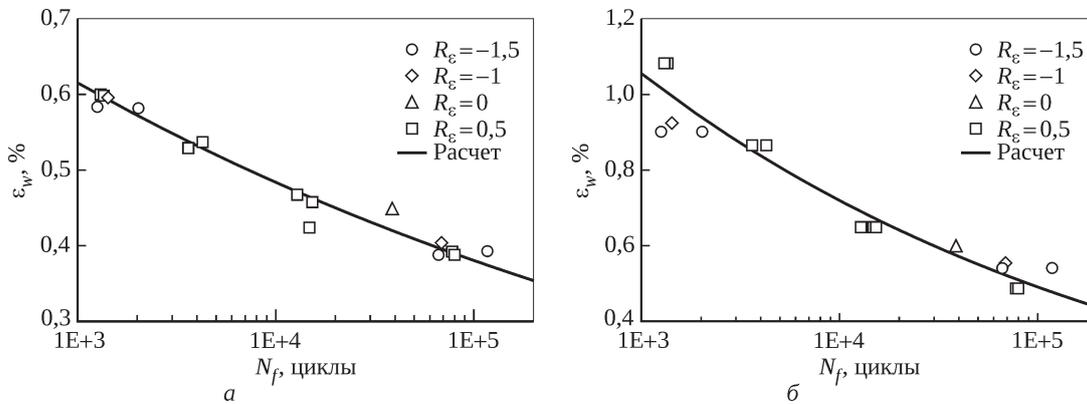


Рис. 9. Зависимости $\varepsilon_w - \lg N_f$ для сплава ЭИ698-ВД при 550°C :
 а – модель Уокера (5); б – предложенная модель (9)

Табл. 4. Параметры моделей для сплава ЭИ698-ВД

Модель	w	$S(\lg N_f)$	R^2
$T = 20^\circ\text{C}$			
Модель Уокера (5)	0,38	0,07	0,97
Предложенная модель (9)	0,84	0,12	0,92
$T = 550^\circ\text{C}$			
Модель Уокера (5)	0,41	0,15	0,96
Предложенная модель (9)	0,88	0,19	0,95

Погрешности в оценке долговечности по предложенной модели сопоставимы с погрешностями, получаемыми при использовании модели Уокера, учитывающей асимметрию мягкого нагружения. Для всех рассмотренных материалов среднее квадратическое отклонение логарифма долговечности (при допущении о равномерности дисперсии) не превысило 0,2, а коэффициент детерминации получен выше 0,9, что позволяет считать качество предложенной регрессионной модели высоким.

Для сплава Ti-6Al-4V ELI построенная по двум значениям коэффициента асимметрии цикла ($R_\varepsilon = -1; 0$) предложенная модель показала неконсервативную оценку долговечности при экстраполяции на $R_\varepsilon = 0,5$. Эта же модель, построенная по двум крайним значениям коэффициента асимметрии ($R_\varepsilon = -1; 0,5$) показала возможность излишне консервативной оценки долговечности при $R_\varepsilon = 0$. Границами применимости предложенной модели является тот диапазон долговечностей, в котором выполняется построение модели, а ограничением следует считать условия чистого сжатия, когда

$\varepsilon_{\max} \leq 0$. С целью повышения качества регрессионной модели рекомендуется использовать результаты испытаний образцов при трех и более значениях коэффициента асимметрии цикла деформаций. Предложенная модель может быть использована в оценках циклической долговечности деталей в зонах концентрации напряжений.

Автор благодарит начальника сектора Шибеева С.А. за предоставленные экспериментальные данные о сплаве ЭИ698-ВД.

Литература / Reference

1. Конструкционная прочность материалов и деталей ГТД : руководство для конструкторов / Балашов Б.Ф., Дульнев Р.А., Захарова Т.П., Козлов Л.А. ; отв. ред. И.А. Биргер, Б.Ф. Балашов. М. : ЦИАМ, 1979. 522 с. (Труды ЦИАМ ; № 835).
Konstruktsionnaia prochnost' materialov i detalei GTD : rukovodstvo dlia konstruktorov [Structural strength of GTE materials and parts: a guidebook for designers]. Balashov B.F., Dul'nev R.A., Zakharova T.P., Kozlov L.A., managing editors: I.A. Birger, B.F. Balashov. Moscow: CIAM, 1979. 522 p. (Proceedings of CIAM, no. 835).
2. ASTM E739-10. Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain-life (ε -N) fatigue data. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2015. URL: www.astm.org.
3. Goodman J. Mechanics applied to engineering. London : Longmans, Green and Co., 1919. 854 p.
4. Smith K.N., Watson P., Topper T.H. A stress-strain function for the fatigue of metals // Journal of Materials, JMLSA. 1970. Vol. 5, no. 4. P. 767–778.
5. Walker E.K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum // Effect of Environment and Complex Load History on Fatigue Life : a symposium presented at the Fall Meeting American Society For Testing and Materials, Atlanta, Ga., 29 September – 4 October, 1968 / ed. M. Rosenfeld. West Conshohocken, PA : ASTM International, 1970. (ASTM Special Technical Publication ; 462). P. 1–14.
6. Nicholas T. High cycle fatigue : A mechanics of materials perspective. Elsevier Science, 2006. 656 p.
7. Dowling N.E., Calhoun C.A., Arcari A. Mean stress effects in stress-life fatigue and the Walker equation // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2009. Vol. 32, no. 3. P. 163–179.
8. Dowling N.E. Mean stress effects in strain-life fatigue // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2009. Vol. 32, no. 12. P. 1004–1019.
9. A modified Walker model dealing with mean stress effect in fatigue life prediction for aeroengine disks / S. Lu, Y. Su, M. Yang, Y. Li // Mathematical Problems in Engineering. 2018. Vol. 2018. Article ID 5148278. 12 p.
10. Evaluation of mean stress effect on fatigue life by use of damage parameters / M. Nihei, P. Heuler, Ch. Boller, T. Seeger // International Journal of Fatigue. 1986. Vol. 8, no. 3. P. 119–126.
11. Ince A., Glinka G. A modification of Morrow and Smith-Watson-Topper mean stress correction models // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2011. Vol. 34, no. 11. P. 854–867.
12. Niesłony A., Böhm M. Mean stress effect correction using constant stress ratio S-N curves // International Journal of Fatigue. 2013. Vol. 52. P. 49–56.
13. Effect of mean stress and ratcheting strain on the low cycle fatigue behavior of a wrought 316LN stainless steel / X. Yuan, W. Yu, S. Fu, D. Yu, X. Chen // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 677. P. 193–202.
14. Ince A. A mean stress correction model for tensile and compressive mean stress fatigue loadings // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2017. Vol. 40, no. 6. P. 939–948.
15. Fatigue behavior of Ti-6Al-4V ELI including mean stress effects / P.E. Carrion, N. Shamsaei, S.R. Daniewicz, R.D. Moser // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 99, part 1. P. 87–100.
16. Generalized probabilistic model allowing for various fatigue damage variables / J. Correia, N. Apetre, A. Arcari, A. De Jesus, M. Muñiz-Calvente, R. Calçada, F. Berto, A. Fernández-Canteli // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 100, part 1. P. 187–194.

-
17. Comprehensive investigation of fatigue behavior and new strain-life model for CP-Ti under different loading conditions / L. Chang, T.-H. Ma, B.-B. Zhou, J.-B. Wen, X.-H. He, C.-Y. Zhou // *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 129. Article 105220.
 18. Golowin A., Denk V., Riepe A. Probabilistic damage tolerance methodology for solid fan blades and disks // *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 10, no. 5. P. 932–937.
 19. Guidelines for the presentation of data // *Metallic materials properties development and standardization (MMPDS) : MMPDS-07*, April 2012. Washington, D.C. : Federal Aviation Administration, 2012. Chap. 9. P. C9-1–C9-365.
 20. Weibull W. *Fatigue testing and analysis of results*. London : Pergamon Press, 1961. 320 p.
 21. Carrion P.E., Shamsaei N. Strain-based fatigue data for Ti-6Al-4V ELI under fully-reversed and mean strain loads // *Data in Brief*. 2016. Vol. 7. P. 12–15.
 22. ASTM E606/E606M-12. *Standard test method for strain-controlled fatigue testing*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2012. 16 p.
 23. Прогнозирование циклической долговечности дисков ГТД из сплава ЭИ698-ВД с учетом асимметрии цикла нагружения / Васильев Б.Е., Плещеев И.И., Шибяев С.А., Колотников М.Е. // *Вестник УГАТУ*. 2020. Т. 24, № 2 (88). С. 3–12.
Prognostirovanie tsiklicheskoj dolgovechnosti diskov GTD iz splava EI698-VD s uchetom asimmetrii tsikla nagruzheniia [Prediction of cycle fatigue life for gas turbine engine disks made of EI698VD alloy taking into account cycle asymmetry]. Vasil'ev B.E., Pleshcheev I.I., Shibaev S.A., Kolotnikov M.E. *Vestnik USATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University)*. 2020. Vol. 24, no. 2 (88). P. 3–12.

Материалы получены редакцией 08.06.2020