Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

Materials mechanics: strength, durability, safety

DOI: https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-4-50-62

ЦИКЛИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ЭП741НП И ЭИ698ВД ПРИ ЖЕСТКОМ НАГРУЖЕНИИ

© Анастасия Дмитриевна Худякова^{1*}, Антон Николаевич Серветник¹, Михаил Евгеньевич Волков¹, Станислав Богданович Полянский²

¹ Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, Россия, 111116, Москва, Авиамоторная ул., д. 2; *e-mail: adkhudyakova@ciam.ru

² АО «ОДК-Климов», Россия, 194100, г. Санкт-Петербург, Кантемировская ул., д. 11; e-mail: klimov@klimov.ru

Статья поступила 23 сентября 2022 г. Поступила после доработки 28 октября 2022 г. Принята к публикации 30 ноября 2022 г.

Исследовано циклическое поведение жаропрочных никелевых сплавов ЭП741НП и ЭИ698ВД в области малоцикловой усталости при жестком отнулевом режиме испытаний образцов в широком диапазоне размахов деформаций и температур. Проанализированы зависимости амплитуды напряжений, среднего напряжения цикла и размаха пластической деформации от числа циклов. Выделены три стадии циклического поведения материалов: первая — стадия неустановившегося поведения, на которой может происходить как упрочнение или разупрочнение, так и смена упрочнения разупрочнением; вторая — стадия установившегося упрочнения, разупрочнения или стабильности; третья — стадия, связанная с развитием трещины. Предложены качественные и количественные параметры, позволяющие определять на основе анализа зависимости размаха пластических деформаций от номера цикла долю первой стадии циклической нестабильности в общей циклической долговечности и характер поведения материалов на первой и второй стадиях. Для обоих сплавов отмечено отсутствие циклической стабильности практически во всем диапазоне испытаний. Показано, что вклад первой стадии в общую долговечность может составлять до 30 %, причем он тем больше, чем выше размах деформации. Выявлена зависимость характера поведения материалов от температуры. Сплав ЭП741НП на первой и второй стадиях при комнатной температуре разупрочняется, а при повышенных температурах 300, 450 и 600 °С склонен к упрочнению. Сплав ЭИ698ВД на первой стадии при 20 и 400 °С упрочняется, а при 650 °С уже склонен к разупрочнению. На второй стадии сплав ЭИ698ВД при 20 и 650 °С имеет тенденцию к разупрочнению, при 400 °С — к упрочнению. При размахах деформаций 0,6 и 0,7 % оба сплава можно считать циклически стабильными на второй стадии во всем диапазоне температур.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав; малоцикловая усталость; жесткий режим нагружения; пластическая деформация; упрочнение; разупрочнение; стабильность; долговечность.

CYCLIC BEHAVIOR OF HEAT RESISTANT NICKEL-BASE ALLOYS EP741NP AND EI698VD UNDER STRAIN-CONTROL LOADING

Anastasiya D. Khudiakova,^{1*} Anton N. Servetnik,¹ Mikhail E. Volkov,¹ Stanislav B. Polianskii²

¹ Central Institute of Aviation Motors, 2, Aviamotornaya ul., Moscow, 111116, Russia; *e-mail: adkhudyakova@ciam.ru
² JSC "UEC-Klimov", 11, Kantemirovskaya ul., St. Petersburg, 194100, Russia; e-mail: klimov@klimov.ru

Received September 23, 2022. Revised October 28, 2022. Accepted November 30, 2022.

Low cycle fatigue behavior of nickel-base alloys EP741NP and EI698VD under strain-control loading with zero strain ratio was studied for a wide range of strain amplitudes and temperatures. Dependences of the stress amplitude, mean stress and plastic strain range on the number of cycles were analyzed. Three stages of the cyclic behavior were marked out: the first stage of non-steady behavior with hardening, or softening, or transition from hardening to softening; the second stage of steady hardening, softening or stability; and the third stage associated with a crack development. Qualitative and quantitative parameters are proposed that make it possible to determine a share of the first stage of cyclic instability in the

total cyclic durability and the nature of the material behavior in the first and second stages proceeding from the analysis of the dependence of the range of plastic deformations on the cycle number. The absence of cyclic stability was demonstrated for both alloys almost in the whole range of testing. It was shown, that the contribution of the first stage to the fatigue life (total durability) can be up to 30% and the greater the strain range, the greater the contribution. The temperature dependence of the character of cyclic behavior of materials is revealed. Alloy EP741NP is softened at the first and second stages at room temperature and is liable to hardening at elevated temperatures 300, 450 and 600°C, whereas alloy EI698VD is hardened at the first stage at 20 and 400°C, but inclines to softening at 650°C. At the second stage alloy EI698VD inclines to softening at 20 and 650°C and is liable to hardening at 400°C. With strain ranges 0.6 and 0.7%, both alloys can be considered cyclic stable at the second stage over the entire temperature range.

Keywords: nickel-base superalloy; low cycle fatigue; strain-control loading; plastic strain; hardening; softening; cyclic stability; life, durability.

Введение

Жаропрочные никелевые сплавы широко используют в авиационном двигателестроении для изготовления ответственных высоконагруженных деталей, таких как лопатки, диски, валы, корпуса и т.д. Указанный класс материалов обладает уникальным комплексом физических и механических свойств, обеспечивающих ресурс деталей при циклическом характере действия механических нагрузок и температур. Вместе с этим увеличение нагруженности и уровня температур деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) может приводить к снижению их циклической долговечности.

В настоящее время на этапах опытно-конструкторских работ и при увеличении ресурса основных деталей авиационных ГТД используют расчетные методы прогнозирования циклической долговечности, основанные на гипотезе о циклической стабильности механических свойств материала [1, 2]. Существуют и более трудоемкие методы, позволяющие учитывать изменения механических свойств материала в процессе циклического нагружения (см. например, [3-6]). Для обоснования использования в расчетах гипотезы циклической стабильности или учета эффектов упрочнения и разупрочнения материала необходимо в первую очередь провести детальное исследование циклического характера поведения жаропрочных никелевых сплавов. Так как для прогнозирования циклической долговечности деталей используют предположение о жестком нагружении зон концентрации напряжений, то представляет интерес исследование циклического поведения материалов в лабораторных условиях испытаний на стандартных гладких образцах при жестком режиме нагружения.

Наиболее простым параметром оценки циклического поведения материала в случае жесткого режима нагружения является максимальное напряжение цикла: при его увеличении говорят о циклическом упрочнении материала, а при его снижении — о циклическом разупрочнении [7, 8]. В работе [9] на зависимости максимально-

го напряжения цикла от числа циклов представлены три стадии циклического разупрочнения материала: резкого разупрочнения при уменьшающейся скорости разупрочнения; установившегося разупрочнения; ускоренного разупрочнения непосредственно до разрушения. В работе [10] эффекты циклического упрочнения и разупрочнения жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 в диапазоне амплитуд деформаций от 0,46 до 1,2 % при температуре 600 °C представлены параметром амплитуды напряжений. Показано, что практически во всем рассмотренном диапазоне амплитуд деформаций наблюдается разупрочнение материала, которое выражается в снижении амплитуды напряжений. В работе [11] циклическое поведение сплава Inconel 718 SLM в условиях испытаний при амплитудах деформаций 0,6 и 0,7 % и температуре 600 °C оценивалось по характеру изменения как напряжений, так и размаха пластической деформации. Выделяют три стадии протекания процесса: начальную, установившуюся и конечную стадию, характеризующуюся резким изменением пластической деформации. Показано, что изменение размаха пластической деформации коррелирует с изменением напряжений. В работе [12] эффекты циклического поведения жаропрочного никелевого сплава GH4169 представлены показателем циклического разупрочнения, демонстрирующим, насколько амплитуда напряжений первого цикла отличается от амплитуды напряжений цикла, соответствующего половине числа циклов до разрушения. Обнаружено, что с увеличением амплитуды деформации показатель увеличивается. Подобный показатель циклического разупрочнения приведен в работе [13], но вместо первого цикла использован цикл, в котором достигнута максимальная амплитуда напряжений. В работе [14] циклическое поведение сплава Sanicro 25 при размахах деформаций от 0,6 до 1 % и температуре 700 °C оценивалось по характеристикам участка установившегося упрочнения на основе двух параметров. Первый параметр равен отношению долговечности на этом участке к общей

циклической долговечности, второй — отношению изменения амплитуды напряжений при установившемся упрочнении к долговечности на этом участке. Авторы показали, что с увеличением амплитуды деформации происходит снижение первого параметра и рост второго. В работе [15] для анализа циклического поведения никелевого сплава Haynes 282 использованы более сложные параметры цикла напряжений, учитывающие изменение как максимального напряжения цикла, так и предела текучести в полуцикле разгрузки.

В данной работе выполнено детальное исследование характера циклического поведения жаропрочных никелевых сплавов ЭП741НП и ЭИ698ВД в области малоцикловой усталости (МЦУ). Проанализированы результаты испытаний, проведенные в условиях жесткого отнулевого режима нагружения в широком диапазоне размахов деформаций и температур. На основе анализа зависимостей амплитуды напряжений, среднего напряжения цикла и размаха пластической деформации от числа циклов предложены параметры количественной оценки эффектов циклического упрочнения и разупрочнения материалов, которые могут быть использованы при выборе или усовершенствовании методов прогнозирования циклической долговечности деталей авиационных ГТД.

Таблица 1. Химический состав (остальное — никель) сплавов ЭП741НП и ЭИ698ВД [14 – 16], % масс.

Table 1.	Chemical	composition	(balance	 Ni)	of	alloys
EP741NP	and EI69	8VD[14 - 16]	, %wt.			

	,	
	ЭП741НП	ЭИ698ВД
C	0,02 - 0,06	0,03 - 0,08
Cr	8,0 - 10,0	13,0 - 16,0
Мо	3,5-4,2	2,8 - 3,2
W	4,8 - 5,9	—
Al	4,85 - 5,25	1,45 - 1,81
Ti	1,6-2,0	2,35 - 2,75
Co	15,0 - 16,5	—
Nb	2,4 - 2,8	1,9-2,2
Hf	0,1-0,4	—
Si	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Mn	$\leq 0,5$	$\leq 0,4$
S	≤0,009	≤0,007
Р	$\leq 0,015$	≤0,015
Ce	≤0,01	≤0,005
Zr	$\leq 0,015$	—
В	\leq 0,015	≤0,005
Fe	≤0,5	≤2,0

Материалы и условия испытаний

Исследования проводили на серийных жаропрочных никелевых сплавах ЭП741НП и ЭИ698ВД, предназначенных для изготовления роторных деталей турбины и последних ступеней компрессора авиационных ГТД [16–18]. Данные материалы «работают» при высокой температуре в контакте с газовой средой, в том числе насыщенной продуктами горения. Коррозийная стойкость сплавов обусловлена наличием хрома и никеля, а также молибдена, который способствует замедлению негативных процессов [18, 19]. Химический состав сплавов приведен в табл. 1.

Сплав ЭП741НП относится к категории гранулированных. Образцы вырезали из заготовки диска производства АО «ВИЛС» с размером гранул до 100 мкм. Заготовка (диаметром 510 мм, высотой 206 мм) термообработана по режиму: закалка 1210 °C; выдержка 8 ч; охлаждение в печи до 1160 °C и далее на воздухе; старение 870 °C; выдержка 32 ч; охлаждение на воздухе.

Сплав ЭИ698ВД относится к категории деформируемых. Образцы вырезали из заготовки в виде кольца производства АО «Металлургический завод «Электросталь». Заготовка (диаметром 830 мм и высотой 60 мм) термообработана по режиму: первая закалка 1100 °C; выдержка 8 ч; охлаждение на воздухе; вторая закалка 1000 °C; выдержка 4 ч; охлаждение на воздухе; первое старение 775 °C; выдержка 16 ч; охлаждение на воздухе; второе старение 700 °C; выдержка 16 ч; охлаждение на воздухе.

Характеристики кратковременной прочности сплавов при комнатной температуре приведены в табл. 2.

Для испытаний использовали стандартные цилиндрические образцы диаметром 4,37 мм и длиной 13 мм рабочей зоны. После изготовления образцов рабочую зону подвергали финишной операции продольного полирования.

Испытания на МЦУ сплавов ЭП741НП и ЭИ698ВД проводили в условиях жесткого синусоидального отнулевого цикла нагружения согласно ГОСТ 25.502–79. Управление режимом нагружения образца и контроль деформации осу-

Таблица 2. Характеристики кратковременной прочности сплавов ЭП741НП и ЭИ698ВД при комнатной температуре

Table 2.	Tensile	properties	of	alloys	EI741NP	and
EI698BD	at room	temperature				

Сплав	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относи- тельное удлине- ние, %	Относи- тельное сужение, %
ЭП741НП	1370	889	23,6	21,7
ЭИ698ВД	1316	859	40,2	30,9



Рис. 1. Кривые МЦУ, полученные в результате испытаний образцов из сплавов ЭП741НП (*a*), ЭИ698ВД (*б*) **Fig. 1.** LCF curves: EP741NP (*a*), EI698VD (*b*)

ществляли с применением высокотемпературного экстензометра с измерительной базой 12,5 мм. Частота испытания для всех образцов составляла 1 Гц. Условия испытаний и количество образцов, испытанных при каждом режиме, приведены в табл. 3.

Размахи деформаций выбирали таким образом, чтобы обеспечить циклическую долговечность N_f образцов в диапазоне от 10^3 до 10^5 циклов. Критерием окончания испытаний являлось падение на 50 % максимального напряжения цикла либо разрушение образца. Экспериментальные кривые МЦУ, полученные в результате испытаний, приведены на рис. 1.

Анализ результатов испытаний

При испытаниях образцов на МЦУ в условиях жесткого цикла нагружения параметры цикла деформаций — контролируемые переменные. Параметры цикла напряжений, такие как амплитуда напряжений о_а и среднее напряжение о_т цикла, являются зависимыми переменными, значения которых могут изменяться в процессе испытаний.

Циклическое поведение сплавов анализировали по изменению σ_a и σ_m от числа циклов нагружения. Также выполняли анализ изменения размаха пластической деформации $\Delta \varepsilon_{pl}$, определенного как максимальная ширина петли упругопластического гистерезиса.

Испытательной машине требуется некоторое число циклов для выхода на режим нагружения с заданным размахом деформации. В качестве критерия определения номера цикла, при котором машина выходит на заданный режим нагружения, принимали достижение в цикле 99 % размаха деформаций. Для сплава ЭП741НП выход на режим занял от 10 до 20 циклов, для сплава ЭИ698ВД — не превысил десяти циклов. В связи с этим анализ экспериментальных данных проводили с десятого цикла.

Исследуемые зависимости для сплавов ЭП741НП и ЭИ698ВД представляют собой результаты отдельно взятых испытаний, так как характер поведения образцов, испытанных на одном и том же режиме, близок. Для удобства представления результатов зависимости сглажены путем наложения линейного фильтра.

Циклическое поведение сплава ЭП741НП

Сплав ЭП741НП при комнатной температуре и высоких размахах деформаций — от 1 до 1,5 % — характеризуется начальным упрочнением, т.е. увеличением σ_a в пределах первых 100 циклов, которое сменяется разупрочнением, т.е. уменьшением σ_a непосредственно до окончания

Таблица 3. Условия испытаний и количество испытанных образцов

Table 3.	Test	conditions	and	the	number	of	tested	speci-
mens								

Сплав	Темпера- тура <i>Т</i> , °С	Размах дефор- маций Δε, %	Количество испытанных образцов
ЭП741НП	20	0,6, 0,8, 1, 1,2, 1,5	2, 3, 3, 4, 3
	300	0,8,0,9,1,1,2	3, 2, 5, 3
	450	0,7, 0,8, 0,9, 1, 1,2	2, 3, 2, 3, 1
	600	0,7, 0,8, 0,9, 1, 1,2	2, 3, 3, 3, 2
ЭИ698ВД	20	0,6, 0,7, 0,8, 1, 1,2	3, 3, 3, 3, 3
	400	0,6, 0,8, 1	2, 2, 2
	650	0,6, 0,8, 1	2, 2, 2



Рис. 2. Зависимости амплитуды напряжений от числа циклов нагружения сплава ЭП741НП при различных значениях температур и размахов деформаций: 20 (*a*), 300 (*б*), 450 (*в*), 600 °C (*г*)

Fig. 2. Dependence of the stress amplitudes on the number of loading cycles (EP741NP) for different temperatures and strain ranges: 20 (a), 300 (b), 450 (c), 600°C (d)

испытаний (рис. 2, *a*). При размахе деформации 0,8 % сплав ЭП741НП разупрочняется в течение всего испытания, а при размахе деформации 0,6 % после незначительного начального упрочнения его состояние стабилизируется.

Сплав ЭП741НП при повышенных температурах и размахах деформаций от 0,8 до 1,2 % проявляет склонность к упрочнению и при размахе деформации 0,7 % — к стабильности (рис. 2, $\delta - \epsilon$).

На последних циклах нагружения для большинства образцов наблюдается падение амплитуды напряжений, что связывают с этапом развития в них трещины МЦУ [20].

Зависимости σ_m от числа циклов (рис. 3) показывают незначительное снижение средних напряжений сплава ЭП741НП. При комнатной температуре и размахах деформаций от 1 до 1,5 % после начальной релаксации средние напряжения стабилизируются (рис. 3, a). При размахах деформаций 0,7 и 0,8 % и температурах 450 и 600 °С наблюдается стремительное падение средних напряжений (рис. 3, e, z). Испытательная машина резко снижает нагрузку, реагируя на мгновенное удлинение образца, которое фиксируется резким увеличением максимальных деформаций в цикле (рис. 4). Такое поведение материала говорит о проявлении эффекта прерывистой текучести в сплаве ЭП741НП [21].

Анализ циклического поведения сплава ЭП741НП по изменению размаха пластической деформации показал (рис. 5), что при выбранных условиях испытаний $\Delta \varepsilon_{pl}$ не является стабильным параметром. Сплав ведет себя относительно стабильно при размахах деформаций 0,6 и 0,7 %, где значения $\Delta \varepsilon_{pl}$ близки к нулю.

Для размахов деформаций выше 0,7 % характер изменения $\Delta \varepsilon_{nl}$ с номером цикла противопо-



Рис. 3. Зависимости среднего напряжения от числа циклов нагружения сплава ЭП741НП при различных значениях температур и размахов деформаций: 20 (*a*), 300 (*б*), 450 (*в*), 600 °С (*z*)

Fig. 3. Dependence of the mean stress value on the number of loading cycles (EP741NP) for different temperatures and strain ranges: 20 (a), 300 (b), 450 (c), 600°C (d)

ложен поведению σ_{a} — при уменьшении $\Delta \varepsilon_{pl}$ происходит упрочнение, а при увеличении $\Delta \varepsilon_{pl}$ разупрочнение.

Циклическое поведение сплава ЭИ698ВД

При рассмотренных условиях испытаний сплав ЭИ698ВД характеризуется начальным упрочнением, которое сменяется разупрочнением непосредственно до окончания испытаний (рис. 6). При размахе деформации 0,6 % амплитуда напряжений сплава ЭИ698ВД стабильна.

Средние напряжения σ_m снижаются при всех выбранных условиях испытаний (рис. 7). При комнатной температуре после начального снижения σ_m наблюдается их достаточная стабильность, а при повышенных температурах и размахах деформаций выше 0,6 % напряжения σ_m уменьшаются во всем диапазоне долговечностей.



Рис. 4. Проявление эффекта прерывистой текучести в сплаве ЭП741НП при 450 °C

Fig. 4. Serrated flow effect of EP741NP alloy at 450°C



Рис. 5. Зависимости размаха пластических деформаций от числа циклов нагружения сплава ЭП741НП при различных значениях температур и размахов деформаций: 20 (*a*), 300 (*б*), 450 (*b*), 600 °C (*z*)

Fig. 5. Dependence of the range of plastic strain on the number of loading cycles (EP741NP) for different temperatures and strain ranges: 20 (a), 300 (b), 450 (c), 600°C (d)



Рис. 6. Зависимости амплитуды напряжений от числа циклов нагружения сплава ЭИ698ВД при различных значениях температур и размахов деформаций: 20 (*a*), 400 (*б*), 650 °С (*в*)

Fig. 6. Dependence of the stress amplitudes on the number of loading cycles (EI698BD) for different temperatures and strain ranges: 20 (a), 300 (b), 450 (c), 600° C (d)

Размах пластической деформации Δε_{pl} для сплава ЭИ698ВД не является стабильным параметром (рис. 8). Наблюдается обратная корреляция между характером изменения $\Delta \varepsilon_{pl}$ и σ_a — при уменьшении $\Delta \varepsilon_{pl}$ происходит упрочнение, а при увеличении $\Delta \varepsilon_{pl}$ — разупрочнение.



Рис. 7. Зависимости среднего напряжения от числа циклов нагружения сплава ЭИ698ВД при различных значениях температур и размахов деформаций: 20 (*a*), 400 (*b*), 650 °C (*b*)

Fig. 7. Dependence of the mean stress value on the number of loading cycles (EI698BD) for different temperatures and strain ranges: 20 (a), 300 (b), 450 (c), 600° C (d)



Рис. 8. Зависимости размаха пластических деформаций от числа циклов нагружения сплава ЭИ698ВД при различных значениях температур и размахов деформаций: 20 (*a*), 400 (*б*), 650 °C (*в*)

Fig. 8. Dependence of the range of plastic strain on the number of loading cycles (EI698BD) for different temperatures and strain ranges: 20 (a), 300 (b), 450 (c), 600°C (d)

Обсуждение результатов

Результаты исследований показывают, что в жаропрочных никелевых сплавах ЭП741НП и ЭИ698ВД в процессе циклического жесткого нагружения проявляются эффекты циклического упрочнения и разупрочнения (циклической нестабильности), причем характер циклического поведения в процессе одного испытания может меняться. В редких случаях наблюдается эффект циклического разупрочнения или стабильности во всем диапазоне долговечности. В силу наблюдаемой обратной корреляции между амплитудой напряжений и размахом пластической деформации количественную оценку циклического поведения свойств жаропрочных никелевых сплавов предложено проводить по зависимости $\Delta \varepsilon_{nl}$ от числа циклов нагружения N. Дополнительным обоснованием выбора $\Delta \varepsilon_{nl}(N)$ является то, что модели оценки циклической долговечности деталей в области МЦУ преимущественно содержат параметры цикла деформации.

На рис. 9 и 10 для сплавов ЭП741НП и ЭИ698ВД представлены зависимости $\Delta \varepsilon_{pl}$ от относительной циклической долговечности N/N_f .

Видно, что в первой трети долговечности располагается первая стадия неустановившегося процесса, на которой происходит резкое упрочнение, разупрочнение либо (при больших размахах деформаций) начальное упрочнение, сменяющееся разупрочнением. Первая стадия переходит во вторую стадию установившегося упрочнения, разупрочнения или стабильности. Вторую стадию установившегося процесса, близкого к линейному закону, который можно представить уравнением h(N) линейной регрессии (рис. 11). И наконец, установившийся процесс переходит в третью стадию с характерным существенным отклонением от линейного закона, что может быть связано с развитием трещины МЦУ. Таким обра-



Рис. 9. Зависимости размаха пластических деформаций от относительной циклической долговечности для сплава ЭП741НП при различных значениях температур и размахов деформаций: 20 (*a*), 300 (*b*), 450 (*b*), 600 °C (*c*)

Fig. 9. Dependence of the range of plastic strain on the relative cyclic durability of EP741NP alloy for different values of temperatures and strain ranges: 20 (*a*), 300 (*b*), 450 (*c*), 600°C (*d*)

зом, может быть выделен общий участок установившегося процесса от N_1 до N_2 , на котором практически все отклонения $\Delta \varepsilon_{pl}(N)$ от h(N) лежат в пределах полосы $h(N) \pm 3\sqrt{s_{oct}^2}$, где s_{oct}^2 —

дисперсия остатков линейной регрессии.

Для количественной оценки характера циклического поведения материалов предложены два параметра. Первый параметр показывает, какая часть общей долговечности приходится на первую стадию неустановившегося процесса:

$$K_{1} = \frac{N_{1}}{N_{f}} \operatorname{sign}(h(N_{1}) - \Delta \varepsilon_{pl}^{0}) \cdot 100,$$
 (1)

где $\Delta \varepsilon_{pl}^{0}$ — размах пластических деформаций в начале нагружения. Знак параметра K_1 определяет, упрочнился ($K_1 < 0$) или разупрочнился ($K_1 > 0$) материал к окончанию первой стадии.

Второй параметр

$$K_2 = h(N_2) - h(N_1) \tag{2}$$

характеризует изменение размаха пластической деформации на второй стадии установившегося процесса и позволяет определить условия испытаний, при которых наблюдается установившееся упрочнение ($K_2 < -\Delta$), установившееся разупрочнение ($K_2 > \Delta$) и стабильность ($-\Delta \le K_2 \le \Delta$). В настоящей работе $\Delta = 0,01$ %.

Зависимости параметров K_1 и K_2 от размаха деформаций и температуры для сплавов ЭП741НП и ЭИ698ВД приведены на рис. 12 и 13 (на последнем выделена область циклической стабильности с границами ±0,01 %).

К окончанию первой стадии при комнатной температуре сплав ЭП741НП разупрочняется, при этом около 30 % общей долговечности



Рис. 10. Зависимости пластических деформаций от относительной циклической долговечности для сплава ЭИ698ВД при различных значениях температур и размахов деформаций: 20 (*a*), 400 (*b*), 650 °С (*b*)

Fig. 10. Dependences of the range of plastic strain on the relative cyclic durability of EI698BD alloy for different values of temperatures and strain ranges: 20 (a), 400 (b), 650°C (c)

приходится на неустановившийся процесс (см. рис. 12, *a*). Исключение составляет испытание при размахе деформации 0,6 %, при котором первая стадия отсутствует. При температурах 300, 450 и 600 °C, наоборот, сплав ЭП741НП к окончанию первой стадии упрочняется, при этом наблюдается повышение доли первой стадии с увеличением размаха деформаций, не превышающей 20 % от общей долговечности.

К окончанию первой стадии сплав ЭИ698ВД упрочняется при 20 и 400 °С и разупрочняется при 650 °С. Наблюдается повышение доли первой стадии с увеличением размаха деформаций, не превышающей 30 % от общей долговечности (см. рис. 12, б).

На второй стадии сплав ЭП741НП склонен к разупрочнению при комнатной температуре и



Рис. 11. Схематичное представление второй стадии установившегося характера поведения материала

Fig. 11. Schematic representation of the second stage of the steady state behavior of the material



Рис. 12. Зависимости *K*₁ от размаха деформаций и температуры для сплавов ЭП741НП (*a*), ЭИ698ВД (*б*) **Fig. 12.** *K*₁ vs. strain range and temperature: EP741NP (*a*), EI698VD (*b*)



Рис. 13. Зависимости *K*₂ от размаха деформаций и температуры для сплавов ЭП741НП (*a*), ЭИ698ВД (*б*) **Fig. 13.** *K*₂ vs strain range and temperature: EP741NP (*a*), EI698VD (*b*)

упрочнению при температурах 300, 450 и 600 °С (см. рис. 13, a). На этой же стадии сплав ЭИ698ВД склонен к разупрочнению как при комнатной температуре, так и при температуре 650 °С, а также к упрочнению при температуре 400 °С (см. рис. 13, δ). Отмечено, что параметр K_2 увеличивается по абсолютной величине с ростом размаха деформаций. При размахах деформаций 0,6 и 0,7 % оба сплава можно считать циклически стабильными на второй стадии во всем диапазоне температур.

Заключение

У сплавов ЭП741НП и ЭИ698ВД в условиях жесткого малоциклового нагружения выявлены три характерные стадии циклического поведения в пределах одного испытания: циклической нестабильности (резкое начальное упрочнение, разупрочнение или упрочнение, сменяющееся разупрочнением); установившегося процесса (упрочнение, разупрочнение либо стабильность); резкого отклонения от установившегося процесса в конце испытания. На основе анализа изменения размаха пластической деформации от числа циклов предложены два параметра для качественной и количественной оценки характера циклического поведения материалов. Первый параметр показывает, какую часть общей долговечности составляет первая стадия циклической нестабильности, а также характер этой нестабильности к окончанию первой стадии. Второй параметр отражает изменение размаха пластической деформации на второй стадии установившегося процесса и позволяет определить условия испытаний, при которых на этой стадии наблюдаются упрочнение, разупрочнение или стабильность.

В результате исследований сплавов ЭП741НП и ЭИ698ВД установлено отсутствие их циклической стабильности, за исключением сплава ЭП741НП при комнатной температуре и размахе деформации 0,6 %. Доля первой стадии в общей циклической долговечности растет с размахом деформаций для обоих сплавов и не превышает 20 % для сплава ЭП741НП и 30 % для сплава ЭИ698ВД.

Выявлена зависимость характера поведения материалов от температуры. Сплав ЭП741НП на первой и второй стадиях при комнатной температуре разупрочняется, а при температурах 300, 450 и 600 °C склонен к упрочнению. Сплав ЭИ698ВД на первой стадии при 20 и 400 °C упрочняется, а при 650 °C имеет тенденцию к разупрочнению. На второй стадии сплав ЭИ698ВД при 20 и 650 °C склонен к разупрочнению и при 400 °C — к упрочнению. При размахах деформаций 0,6 и 0,7 % оба сплава можно считать циклически стабильными на второй стадии во всем диапазоне температур.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Биргер И. А., Балашов Б. Ф., Дульнев Р. А. и др. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1981. 222 с.
- Иноземцев А. А., Сандрацкий В. Л. Газотурбинные двигатели. — Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. — 1204 с.

- Chaboche J. L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories / International Journal of Plasticity. 2008. Vol. 24. Issue 10. P. 1642 – 1693. DOI: 10.1016/j.ijplas.2008.03.009
- Махутов Н. А., Гаденин М. М., Чернявский О. Ф., Чернявский А. О. Исследования свойств материалов при сложных условиях малоциклового деформирования / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 7. С. 49 – 58. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-7-49-58
- Temis Y. M. Mathematical simulation of low-cycle fatigue of high-loaded engine parts / Propulsion and power research. 2018. Vol. 7. Issue 4. P. 277 – 287. DOI: 10.1016/j.jppr.2018.11.006
- Бондарь В. С., Абашев Д. Р., Петров В. К. Сравнительный анализ вариантов теорий пластичности при циклических нагружениях / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 2. С. 23 – 44. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.02
- Махутов Н. А., Гаденин М. М., Чернявский О. Ф., Чернявский А. О. Механические свойства материалов в расчетах малоциклового деформирования конструкций / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 6. С. 52 – 59. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-52-59
- 8. Kang G., Kan Q. Cyclic Plasticity of Engineering Materials: experiments and models. — John Wiley & Sons, 2017. — 543 p.
- Li D. H., Li M., Shang D.-G., et al. Physically-based modeling of cyclic softening and damage behaviors for a martensitic turbine rotor material at elevated temperature / International Journal of Fatigue. 2021. Vol. 142. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105956
- Banerjee A., Sahu J. K., Paulose N., et al. Micromechanism of cyclic plastic deformation of alloy IN718 at 600°C / Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2016. Vol. 39. Issue 7. P. 877 – 885. DOI: 10.1111/ffe.12406
- Ma L., Zhang L., Guo F., et al. High-temperature mechanical behavior assessment based on a developed constitutive model of Inconel 718 fabricated by selective laser melting / Advanced Engineering Materials. 2021. Vol. 23. Issue 8. DOI: 10.1002/adem.202100232
- Chen G., Zhang Y., Xu D. K., et al. Low cycle fatigue and creep-fatigue interaction behavior of nickel-base superalloy GH4169 at elevated temperature of 650°C / Material Science & Engineering A. 2016. Vol. 655. P. 175 – 182. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.096
- Wang R.-Z., Zhu S.-P., Wang J., et al. High temperature fatigue and creep-fatigue behaviors in Ni-based superalloy: damage mechanisms and life assessment / International Journal of Fatigue. 2018. Vol. 118. P. 8 – 21.

DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.05.008

- Li H., Jing H., Xu L., et al. Microstructure mechanism, cyclic deformation behavior of an Fe-Ni0Cr alloy considering non-Masing behavior/ Internationl Journal of Fatigue. 2019. Vol. 127. P. 537 – 550. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.035
- Brommesson R., Ekh M., Persson C. Experimental observations and modeling of cyclic and relaxation behaviour of the Ni-based superalloy Haynes 282 / International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 87. P. 180 – 191. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.01.027
- 16. Гарибов Г. С. Создание технологии металлургии гранул жаропрочных никелевых сплавов — наиболее яркая страница в истории развития всероссийского института легких сплавов / Технология легких сплавов. 2021. № 2. С. 38 – 47. DOI: 10.24412/0321-4664-2021-2-38-47
- Логунов А. В., Шмотин Ю. Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). — М.: Наука и технологии, 2013. — 264 с.
- Машиностроение. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Том II-3. Композиционные металлические материалы / Под общ. ред. И. Н. Фридляндера. — М.: Машиностроение, 2001. — 880 с.
- Авиационные материалы. Справочник. В 9 т. Т. 3. Жаропрочные стали и сплавы. Ч. 1. Деформируемые жаропрочные стали и сплавы: Сплавы на основе тугоплавких метал-

лов / Под общ. ред. чл.-корр. АН СССР А. Т. Туманова. — М.: ОНТИ, 1989. — 567 с.

- Терентьев В. Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003. — 254 с.
- Серветник А. Н., Волков М. Е. Экспериментальные исследования скачкообразной пластической деформации в жаропрочных никелевых сплавах для дисков АГТД / Сборник тезисов НТКД-2018. Т. 2. — Москва, 2018. — 342 с.

REFERENCES

- Birger I. A., Balashov B. F., Dul'nev R. A., et al. The design strength of materials and parts of gas turbine-engines. — Moscow: Mashinostroenie, 1981. — 222 p. [in Russian].
- Inozemtsev A. A., Sandratsky V. L. Gas Turbine-Engines. — Perm: OAO "Aviadvigatel'", 2006. — 1204 p. [in Russian].
- Chaboche J. L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories / International Journal of Plasticity. 2008. Vol. 24. Issue 10. P. 1642 – 1693. DOI: 10.1016/j.ijplas.2008.03.009
- Makhutov N. A., Gadenin M. M., Cherniavsky O. F., Cherniavsky A. O. Study of the properties of materials under complicated conditions of low cycle deformation / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2021. Vol. 87. N 7. P. 49 – 58 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-7-49-58
- Temis Y. M. Mathematical simulation of low-cycle fatigue of high-loaded engine parts / Propulsion and power research. 2018. Vol. 7. Issue 4. P. 277 – 287. DOI: 10.1016/j.jppr.2018.11.006
- Bondar V. S., Abashev D. R., Petrov V. K. Comparative analysis of variants of plasticity theories under cyclic / Vestn. Perm. Nats. Issl. Politekhn. Univ. Mekh. 2017. N 2. P. 23 – 44. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.02
- Makhutov N. A., Gadenin M. M., Cherniavsky O. F., Cherniavsky A. O. Mechanical properties of materials in calculations of low cycle deformation of structures / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2022. Vol. 88. N 6. P. 52 59. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-52-59
- 8. Kang G., Kan Q. Cyclic Plasticity of Engineering Materials: experiments and models. — John Wiley & Sons, 2017. — 543 p.
- Li D. H., Li M., Shang D.-G., et al. Physically-based modeling of cyclic softening and damage behaviors for a martensitic turbine rotor material at elevated temperature / International Journal of Fatigue. 2021. Vol. 142. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105956
- Banerjee A., Sahu J. K., Paulose N., et al. Micromechanism of cyclic plastic deformation of alloy IN718 at 600°C / Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2016. Vol. 39. Issue 7. P. 877 – 885. DOI: 10.1111/ffe.12406
- Ma L., Zhang L., Guo F., et al. High-temperature mechanical behavior assessment based on a developed constitutive model of Inconel 718 fabricated by selective laser melting / Advanced Engineering Materials. 2021. Vol. 23. Issue 8. DOI: 10.1002/adem.202100232
- Chen G., Zhang Y., Xu D. K., et al. Low cycle fatigue and creep-fatigue interaction behavior of nickel-base superalloy GH4169 at elevated temperature of 650°C / Material Science & Engineering A. 2016. Vol. 655. P. 175 – 182. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.096
- Wang R.-Z., Zhu S.-P., Wang J., et al. High temperature fatigue and creep-fatigue behaviors in Ni-based superalloy: damage mechanisms and life assessment / International Journal of Fatigue. 2018. Vol. 118. P. 8 – 21. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.05.008
- Li H., Jing H., Xu L., et al. Microstructure mechanism, cyclic deformation behavior of an Fe-NiOCr alloy considering non-Masing behavior/ Internationl Journal of Fatigue. 2019. Vol. 127. P. 537 – 550. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.035
- Brommesson R., Ekh M., Persson C. Experimental observations and modeling of cyclic and relaxation behaviour of the Ni-based superalloy Haynes 282 / International Journal of Fa-

tigue. 2016. Vol. 87. P. 180 – 191. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.01.027

- Garibov G. S. Creating of granulation metallurgy technology for heat-resistant nickel-base alloys — the most outstanding part of history of all-Russian light alloy institution development [in Russian] / Tekhnol. Leg. Splavov. 2021. N 2. P. 38 – 47 [in Russian]. DOI: 10.24412/0321-4664-2021-2-38-47
- Logunov A. V., Shmotin Yu. N. Up-to-date heat-resistant nickel-base alloys for gas turbine disks (materials and technologies). — Moscow: Nauka i tekhnologii, 2013. — 264 p. [in Russian].
- 18. Mechanical Engineering. Encyclopedia. Nonferrous metals and alloys. Vol. II-3. Composite metallic materials / Ed. by I. N. Frid-

liander. — Moscow: Mashinostroenie, 2001. — 880 p. [in Russian].

- Aircraft materials. Handbook. In 9 v. Vol. 3. Heat-resistant steels and alloys. Part 1. Wrought heat-resistant steels and alloys: Refactory metal-based alloys / A. T. Tumanov (ed.). — Moscow: ONTI, 1989. — 567 p. [in Russian].
- Terent'ev V. F. Metall materials fatigue. Moscow: Nauka, 2003. — 254 p. [in Russian].
- Servetnik A. N., Volkov M. E. Experimental study of discontinuous plastic deformation in nickel-base alloys for AGTE disks / Abstracts of NTKD-2018. Vol. 2. Moscow, 2018. 342 p. [in Russian].