

# Усталость монокристаллов никелевых сплавов ВЖМ-4 и ВЖМ-5 при повышенных температурах

Голубовский Е.Р., Волков М.Е.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: golubovskiy@ciam.ru

Представлены результаты исследований малоциклового и многоциклового усталости монокристаллических образцов из перспективных жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ-4 и ВЖМ-5 при температурах 850 и 1050°C.

**Ключевые слова:** монокристаллические образцы, испытания на малоцикловую и многоцикловую усталость, коэффициент асимметрии, численные модели, кривая малоциклового усталости, кривая многоциклового усталости, характер разрушения.

## Fatigue of single crystal NI-based superalloy VZHM-4 and VZHM-5 at elevated temperatures

Golubovsky E.R., Volkov M.E.

CIAM, Moscow

Results of low-cycle and high-cyclic fatigue researches of advanced VZHM-4 and VZHM-5 NI-based superalloy single crystal specimens at 850 and 1050°C.

**Keywords:** single crystal specimens, low-cycle and high-cyclic fatigue tests, asymmetry coefficient, computation models, low-cycle fatigue curve, high-cyclic fatigue curve, fracture mode.

### Введение

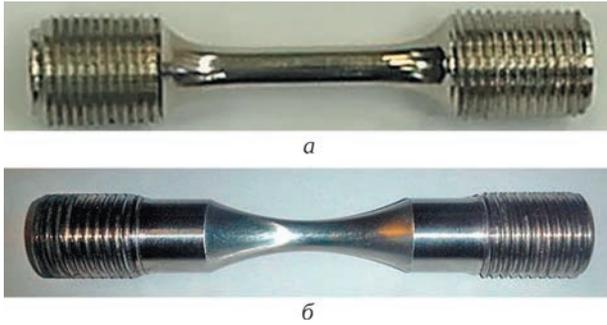
Работоспособность и ресурс лопаток турбин газотурбинных двигателей (ГТД) в значительной степени зависит от сопротивления материала малоциклового (МЦУ) и многоциклового (МнЦУ) усталости. В работе [1] на основании анализа и представительной статистики показано, что причиной 36% аварийных режимов компонентов ГТД является усталость (МЦУ и МнЦУ). Один из компонентов, определяющих работоспособность ГТД, – рабочие монокристаллические с заданной кристаллографической ориентацией (КГО) лопатки турбины высокого давления (ТВД) из жаропрочных никелевых сплавов, которые работают в условиях циклического (малоциклового и многоциклового) нагружения конструкции.

Кристаллографическая ориентация обусловлена технологией кристаллизации монокристаллов никелевого сплава, имеющего гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку (монокристаллы с кубической сингонией кристаллизуются в направлении  $\langle 001 \rangle$ ), которая совпадает с осью лопатки ТВД. Эксперимен-

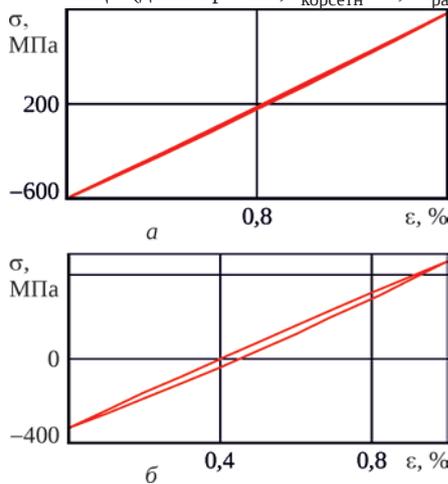
тальные исследования подтверждают наличие анизотропии характеристик упругости, кратковременной и длительной прочности, ползучести, МЦУ («мягкий» цикл) и МнЦУ монокристаллов различных никелевых сплавов в диапазоне рабочих температур [2–6], при этом в направлении  $\langle 001 \rangle$  значения характеристик минимальны. В работе приведены результаты исследования усталости (МЦУ и МнЦУ) монокристаллов перспективных жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ-4 и ВЖМ-5 при температурах 850 и 1050°C [3, 7] в кристаллографическом направлении  $\langle 001 \rangle$ . Эти сплавы разработаны в ВИАМе и рекомендованы для монокристаллических лопаток авиационных ГТД. Статья является обобщением результатов по усталости сплавов ВЖМ-4 и ВЖМ-5 и включает, в том числе, результаты, полученные и опубликованные ранее [14, 16].

### Методика испытаний и обработка экспериментальных данных

Для проведения испытаний на МЦУ и МнЦУ взяты стандартные образцы (рис. 1), заготовки для которых



**Рис. 1.** Образцы для испытаний:  
 а – на МЦУ (диаметр 4,37 мм; рабочая длина 13 мм);  
 б – на МнЦУ (диаметр 5 мм;  $r_{\text{корсетн}} = 7,5 d_{\text{раб}}$ )



**Рис. 2.** ВЖМ-5 с КГО <001>.

Типичные петли гистерезиса при  $R_\epsilon = 0$ :

а – образец № 04 ( $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $\Delta\epsilon = 1,6\%$ ;  $N = N_{f(\text{МЦУ})}/2 = 984$ -й цикл;  $\sigma_{\text{max}} = 975$  МПа;  $\sigma_{\text{min}} = -580$  МПа); б – образец № 21 ( $T = 1050^\circ\text{C}$ ;  $\Delta\epsilon = 1,0\%$ ;  $N = N_{f(\text{МЦУ})}/2 = 1105$ -й цикл;  $\sigma_{\text{max}} = 450$  МПа;  $\sigma_{\text{min}} = -315$  МПа)

получены методом направленной кристаллизации по технологии отливки монокристаллических лопаток с ориентацией оси отливки в направлении КГО <001>.

Режим термообработки отливок соответствует режиму термообработки лопаток [7]. Рабочая часть образцов подвергнута финишной операции – продольному полированию. На установке ДРОН-3 методом рентгеновской дифрактометрии определена КГО продольной оси каждого изготовленного образца (точность измерения  $\sim 1^\circ$ ). Замеренные отклонения оси образца от КГО <001> не превышают  $8^\circ$ , что соответствует требованиям при отливке монокристаллических рабочих лопаток ТВД [7].

Испытания на МЦУ монокристаллических образцов с контролируемой деформацией в цикле (жесткий цикл) при температурах  $850^\circ\text{C}$  (коэффициенты асимметрии цикла:  $R_\epsilon = \epsilon_{\text{min}}/\epsilon_{\text{max}} = -1$  и  $R_\epsilon = 0$ ) и  $1050^\circ\text{C}$  ( $R_\epsilon = 0$ ) выполнены на установках испытательной лаборатории ЦИАМа в соответствии с требованиями российских и зарубежных стандартов [8–10]. Образцы нагревают

в штатных печах электросопротивления. В процессе испытаний для каждого цикла нагружения при заданных значениях температуры  $T$ , коэффициента асимметрии цикла  $R_\epsilon$  и размаха деформации в цикле  $\Delta\epsilon$  регистрировали диаграммы деформирования (петли гистерезиса) (рис. 2), по которым затем определяли значения напряжений  $\sigma(N)_{\text{max}}$  и  $\sigma(N)_{\text{min}}$  в цикле с номером  $N = N_f/2$ , где  $N_f$  – число циклов до разрушения. Основные контролируемые параметры испытания на МЦУ: форма цикла – синусоидальная; частота  $f = 0,5$  Гц. В ходе эксперимента также контролировали минимальную  $\epsilon_{\text{min}}$  и максимальную  $\epsilon_{\text{max}}$  деформации цикла нагружения.

Испытания на МнЦУ проводят на высокочастотных резонансных машинах осевого нагружения AMSLER-100 и AMSLER-300 (Zwick/Roell) с контролируемой нагрузкой в цикле при температурах  $850$  и  $1050^\circ\text{C}$  с коэффициентом асимметрии цикла  $R_\sigma = \sigma_{\text{min}}/\sigma_{\text{max}} = 0,1$ . Режимы испытания следующие: форма цикла – синусоидальная; частота  $f$  составляет  $83 \dots 86$  Гц для  $850^\circ\text{C}$  и  $60 \dots 61$  Гц – для  $1050^\circ\text{C}$ . В ходе эксперимента контролировали статическую  $F_{\text{ст}}$  и динамическую  $F_{\text{амп}}$  составляющие цикла нагружения. По результатам испытаний определено число циклов до разрушения  $N_f$ .

Экспериментальные данные испытаний на МЦУ аппроксимированы степенной (1) и экспоненциальной (2) зависимостями для описания кривой МЦУ

$$N_{f(\text{МЦУ})} = A(\Delta\epsilon)^{-n}; \quad (1)$$

$$N_{f(\text{МЦУ})} = Be^{-\beta\Delta\epsilon}. \quad (2)$$

Для определения зависимости числа циклов  $N = N_{f(\text{МЦУ})}/2$  от напряжений  $\sigma(N)_{\text{max}}$  и  $\sigma(N)_{\text{min}}$  применены аналогичные зависимости:

$$N = N_{f(\text{МЦУ})}/2 = C\sigma^{-m} \text{ только для } \sigma_{\text{max}}; \quad (3)$$

$$N = N_{f(\text{МЦУ})}/2 = De^{-\gamma\sigma}. \quad (4)$$

Адекватность моделей (1)–(4) оценивалась величиной дисперсии  $D(\log N)$ , характеризующей отклонение экспериментальных данных от кривых, построенных по этим уравнениям [4, 11]:

$$D(\log N) = \frac{1}{\theta - 1 - d} \sum_{i=1}^{\theta} (\log N_i^{\text{эксп}} - \log N_i^{\text{расч}})^2, \quad (5)$$

где  $\theta$  – объем выборки экспериментальных данных;  $d$  – число значимых коэффициентов уравнения (1)–(4);  $N_i^{\text{эксп}}$  – экспериментальное число циклов для  $i$ -го образца;  $N_i^{\text{расч}}$  – число циклов из (1)–(4) для  $i$ -го образца.

Результаты испытаний на МнЦУ также были аппроксимированы степенной (6) и экспоненциальной (7) зависимостями. Адекватность, как и для моделей (1)–(4), оценивалась величиной отклонения от (6)–(7):

$$N_{f(\text{МнЦУ})} = F(\Delta\sigma)^{-k}; \quad (6)$$

$$N_{f(\text{МнЦУ})} = Ge^{-\eta\Delta\sigma}. \quad (7)$$

Проведены испытания на МЦУ образцов из сплава ВЖМ-4 с КГО <001> с коэффициентом асимметрии  $R_\varepsilon = 0$  при температурах 850 и 1050°C и образцов из сплава ВЖМ-5 с КГО <001> с коэффициентом асимметрии  $R_\varepsilon = 0$  при 850 и 1050°C и  $R_\varepsilon = -1$  при 1050°C. Образцы из сплава ВЖМ-5 с КГО <001> испытаны на МнЦУ с коэффициентом асимметрии  $R_\sigma = 0,1$  при 850 и 1050°C. Результаты испытаний на МЦУ и МнЦУ приведены на рис. 3 и рис. 4.

При обработке экспериментальных данных установлено, что для кривых МЦУ, описываемых экспоненциальной моделью (2), значения дисперсии меньше  $D(\log N)$ , чем для кривых МЦУ, полученных по модели (1). Для построенных кривых МнЦУ выбрана степенная модель (6) с меньшими значениями  $D(\log N)$  по сравнению с моделью (7). В табл. 1 представлены значения коэффициентов уравнений (2) и (6).

Сопоставление кривых МЦУ для обоих сплавов показывает, что сплав ВЖМ-4 <001> обладает более высоким сопротивлением МЦУ (при  $N_f \geq 10^3$  циклов).

Анализ результатов, представленных на рис. 3,б, показывает, что при одинаковых размахах деформации (например, при  $\Delta\varepsilon = 1,4\%$ ) разрушение при симметричном цикле  $R_\varepsilon = -1$  происходит при больших значениях  $N_{f(МЦУ)}$ , чем при отнулевом цикле  $R_\varepsilon = 0$ . Но при этом необходимо учитывать, что при отнулевом цикле  $R_\varepsilon = 0$  значение  $\varepsilon_{\max}$  в цикле приблизительно в 2 раза больше, чем при симметричном нагружении  $R_\varepsilon = -1$ .

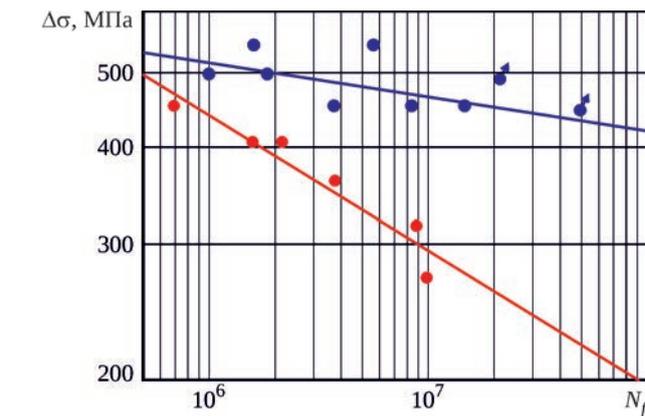
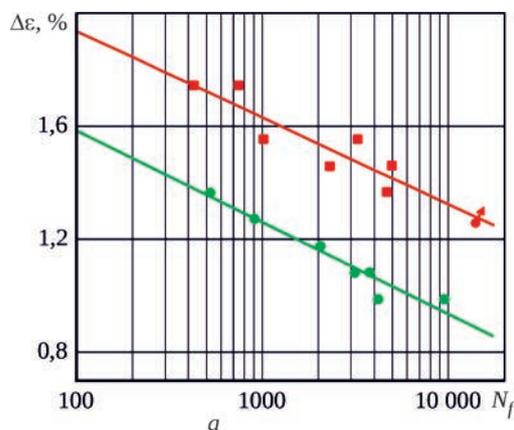


Рис. 4. Результаты испытаний на МнЦУ сплава ВЖМ-5 <001>,  $R_\sigma = 0,1$  (точки – эксперимент): —  $T = 850^\circ\text{C}$ ; —  $T = 1050^\circ\text{C}$ ; — неразрушенный образец при  $T = 850^\circ\text{C}$

Кривая на рис. 3,б, построенная по уравнению Мэнсона [12] ( $E = 99,7$  ГПа,  $\sigma_B = 1060$  МПа,  $\psi = 38,8\%$ ), не описывает экспериментальные результаты МЦУ сплава ВЖМ-5 КГО <001> при температуре 850°C.

На рис. 5 представлены кривые МЦУ ( $R_\varepsilon = \text{const}$ ) сплава ВЖМ-5 КГО <001>, которые описывают характер изменения соотношения максимального и минимального напряжений в цикле с номером  $N = N_f/2$  с долговечностью. Кривые построены по уравнению (4), численные значения коэффициентов которого приведены в табл. 2. При 850°C на базах ( $N = N_f/2$ )  $\geq 10^4$  размах напряжений  $\Delta\sigma$  практически одинаков для МЦУ с  $R_\varepsilon = 0$  и  $R_\varepsilon = -1$  (рис. 5,а).

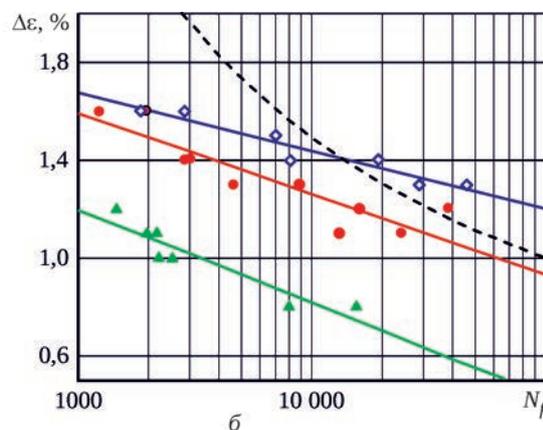


Рис. 3. Результаты испытаний на МЦУ сплавов ВЖМ-4 (а) и ВЖМ-5 (б) (точками обозначены экспериментальные данные): —  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = 0$ ; —  $T = 1050^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = 0$ ; —  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = -1$ ; - - -  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = 0$  (кривая МЦУ по уравнению Мэнсона); — неразрушенный образец при  $T = 850^\circ\text{C}$

Таблица 1. Значения коэффициентов уравнения (2) для кривых МЦУ и уравнения (6) для кривых МнЦУ

T, °C	ВЖМ-4 <001>			ВЖМ-5 <001>					
	МЦУ – уравнение (2)			МЦУ – уравнение (2)			МнЦУ – уравнение (5)		
	$R_\varepsilon$	$\log B$	$\beta$	$R_\varepsilon$	$\log B$	$\beta$	$R_\varepsilon$	$\log F$	$k$
850	0	18,77	7,05	-1	10,063	9,703	0,1	67,23	22,57
				0	7,837	7,003			
1050	0	15,50	6,68	0	6,163	6,089	0,1	21,09	5,71

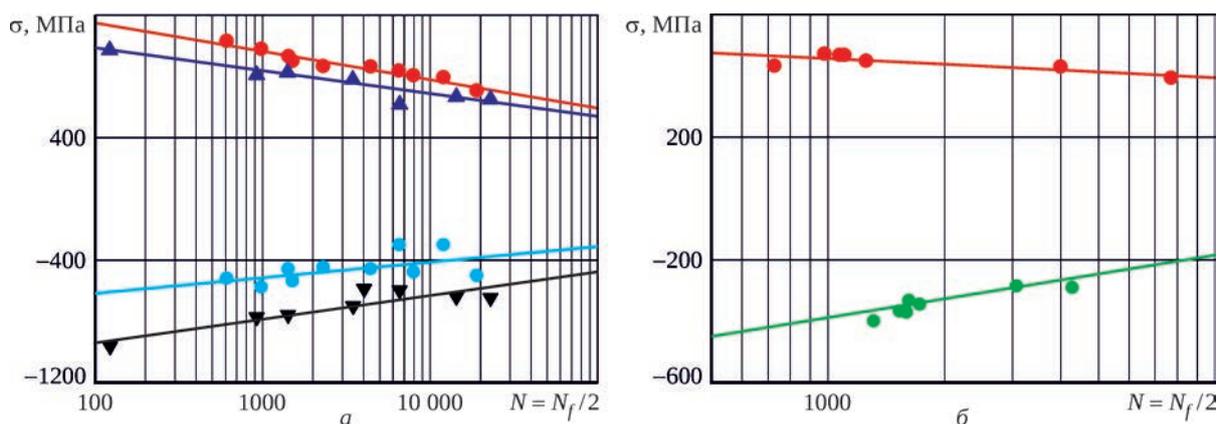


Рис. 5. Кривые МЦУ для сплава ВЖМ-5 с КГО <001> (точками обозначены экспериментальные данные):  
 $a - T = 850^\circ\text{C}$ ;  $b - T = 1050^\circ\text{C}$ ;  $R = 0$ : ● –  $\sigma_{\max}$ ; ● –  $\sigma_{\min}$ ; ● –  $\sigma_{\min}$ ;  $R = -1$ : ▲ –  $\sigma_{\max}$ ; ▼ –  $\sigma_{\min}$

Экспериментальные данные для циклов с номером  $N = N_f/2$  при  $R_\epsilon = \text{const}$  позволяют оценить изменения коэффициента асимметрии по напряжениям  $R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  (рис. 6).

При  $T = 850^\circ\text{C}$  коэффициент асимметрии по напряжениям  $R_\sigma$  для  $N = N_f/2$  и  $R_\epsilon = \text{const}$  практически не изменяется или изменяется незначительно, а при  $T = 1050^\circ\text{C}$  – снижается по абсолютной величине в 2 раза. При этом необходимо учитывать, что в процессе испытаний каждого образца (с момента нагружения до момента разрушения) при  $R_\epsilon = \text{const}$  происходит небольшое уменьшение угла наклона  $\alpha$  петли гистерезиса, но при этом значительно увеличивается коэффициент асиммет-

рии по напряжениям  $R_\sigma$  (рис. 7) в интервале от первого до последнего цикла, соответствующего разрушению.

Результаты испытаний на МнЦУ и соответствующие кривые (см. рис. 4) получены по зависимости (6), значения коэффициентов которой приведены в табл. 1. Экспериментальные данные показывают, что с повышением температуры снижается рассеяние результатов испытаний. Следует отметить, что экспериментальные данные по МнЦУ аппроксимирует степенная зависимость (6), в отличие от данных по МЦУ, которые описывает экспоненциальная зависимость (2).

Результаты испытаний сплава ВЖМ-5 <001> на МЦУ и МнЦУ при температурах 850 и 1050°C использованы для проверки гипотезы о существовании единой кривой усталости, которая выполняется для некоторых сплавов с традиционной поликристаллической структурой [13].

Обработка объединенных экспериментальных данных МЦУ и МнЦУ сплава ВЖМ-5 <001> показали, что при 850°C единая кривая (МЦУ + МнЦУ) не может быть построена по выборке экспериментальных данных ни для размаха напряжений, ни для размаха деформаций. При 1050°C единая обобщенная кривая (МЦУ + МнЦУ) может быть построена только по выборке экспериментальных данных для размаха деформаций (рис. 8,а). Результаты, представленные на рис. 8,б, показывают расхождение экспериментальных кривых МЦУ и МнЦУ для размахов напряжений в цикле с номером  $N_f/2$ .

На рис. 9 представлены изломы образцов после испытаний, анализ которых показывает, что при 850°C (рис. 9,а–в) зарождение усталостной трещины в условиях малоциклового ( $R_\epsilon = 0$  и  $R_\epsilon = -1$ ) и многоциклового усталости (рис. 9,з) происходит от наиболее крупных литейных пор, которые имеются в объеме образца после кристаллизации монокристаллической заготовки и ее термовакуумной обработки в комбинации с процессом горячего изостатического прессования (ГИП).

Таблица 2. Значения коэффициентов моделей (4) зависимости числа циклов  $N = N_f/2$  от напряжений  $\sigma(N)_{\max}$  и  $\sigma(N)_{\min}$  для сплава ВЖМ-5 <001> при МЦУ

$T, ^\circ\text{C}$	$R_\epsilon$	$\sigma_{\max}$		$\sigma_{\min}$	
		$\log D_1$	$\gamma_1$	$\log D_2$	$\gamma_2$
850	-1	8,635	0,015	8,125	-0,015
	0	8,182	0,012	8,062	-0,022
1050	0	10,464	0,038	4,901	-0,011

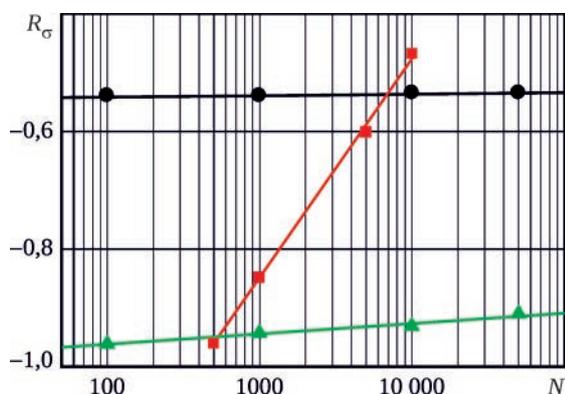
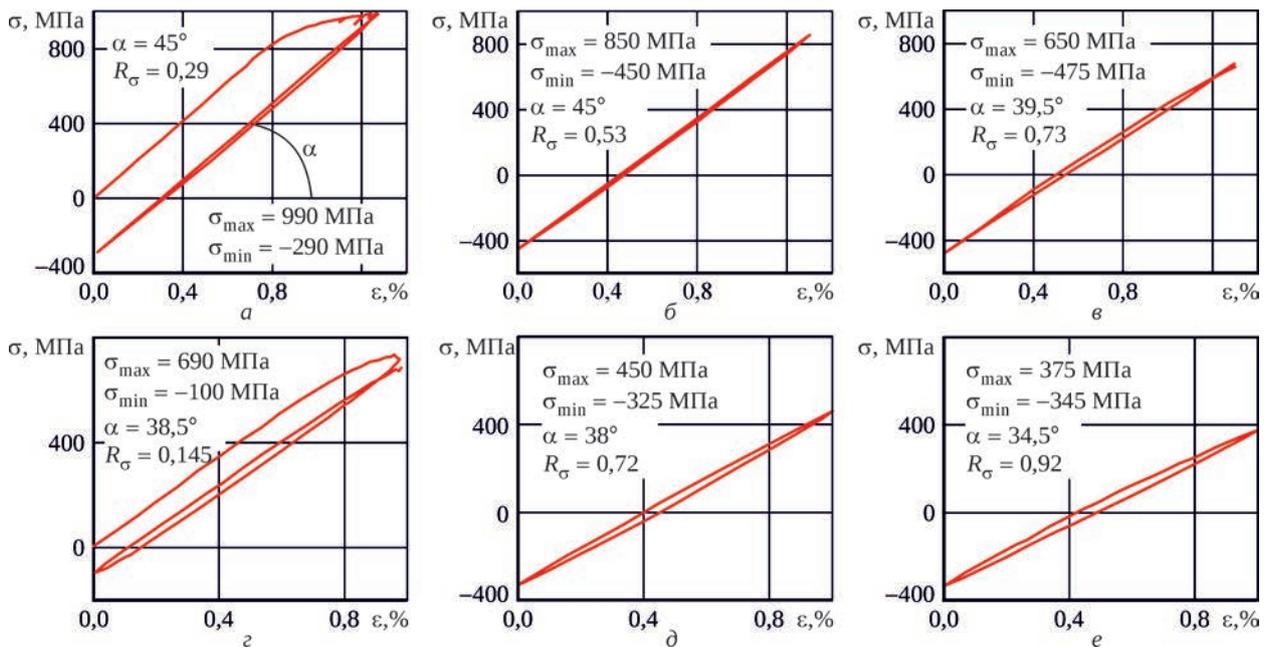
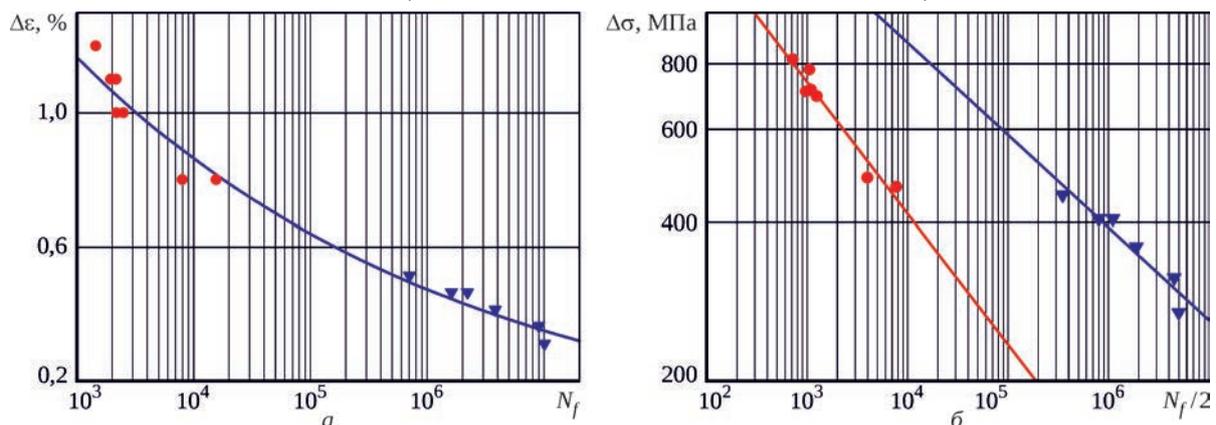


Рис. 6. Зависимость  $R_\sigma$  от числа циклов  $N = N_f/2$  при  $R_\epsilon = \text{const}$  для сплава ВЖМ-5 <001>:  
 ● –  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\epsilon = 0$ ; ▲ –  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\epsilon = -1$ ;  
 ■ –  $T = 1050^\circ\text{C}$ ;  $R_\epsilon = 0$



**Рис. 7.** Эволюция петель гистерезиса в процессе испытаний монокристаллических образцов на МЦУ (сплав ВЖМ-5,  $R_{\sigma} = 0$ ): а-в –  $T = 850^{\circ}\text{C}$ ; образец № 18;  $\Delta\varepsilon = 1,3\%$ ;  $N_f = 4638$  циклов; г-е –  $T = 1050^{\circ}\text{C}$ ; образец № 21;  $\Delta\varepsilon = 1,0\%$ ;  $N_f = 2221$  цикл; а, г – 1-й цикл; б – срединный цикл  $N_f/2 = 2319$ ; в – 4637-й цикл; д – срединный цикл  $N_f/2 = 1110$ ; е – 2210-й цикл



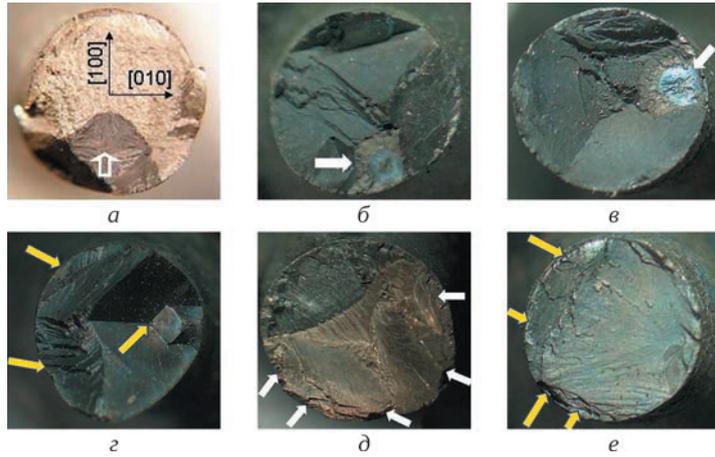
**Рис. 8.** Оценка гипотезы существования единой кривой для диапазона МЦУ + МнЦУ (сплав ВЖМ-5 <001>): а –  $T = 1050^{\circ}\text{C}$ ; МЦУ –  $R_{\sigma} = 0$ ; МнЦУ –  $R_{\sigma} = 0,1$ ; уравнение  $\log N_f = 3,512 - 7,66 \log \Delta\varepsilon$ ; б –  $T = 1050^{\circ}\text{C}$ ; МЦУ –  $R_{\sigma} = 0$ ; МнЦУ –  $R_{\sigma} = 0,1$  для значений  $N = N_f/2$ ; — — — степенная модель; экспериментальные данные: ● – МЦУ; ▼ – МнЦУ

Отметим, что при  $850^{\circ}\text{C}$  трещина МЦУ на начальной стадии формируется в виде прямоугольной фасетки (рис. 9, а-в), форма которой обусловлена различием в скорости роста трещины в кристаллографических направлениях <001> и <011> в кристаллографической плоскости (001) [14]. Аналогичные фасетки обнаружены авторами в изломах монокристаллических образцов из сплава СЛЖС-3 [15] после испытаний на МЦУ ( $R_{\sigma} = 0$ ) при температуре  $850^{\circ}\text{C}$  (рис. 10).

В условиях МЦУ и МнЦУ при  $1050^{\circ}\text{C}$  наблюдается многоочаговое зарождение усталостных трещин от микротрещин на поверхности образца, возникших благодаря высокотемпературной коррозии. Изломы (рис. 9, д, е) показывают, что в основном трещина растет в плоскости, близкой к поперечному сечению образца.

Во введении отмечено, что минимальные значения характеристик усталости имеет КГО <001>. Поэтому в дополнение к полученным результатам целесообразно рассмотреть результаты испытаний двух монокристаллических образцов из сплава ВЖМ-5 с КГО <111> на МЦУ при жестком цикле для  $R_{\sigma} = -1$  при  $850^{\circ}\text{C}$  (рис. 11 и рис. 12).

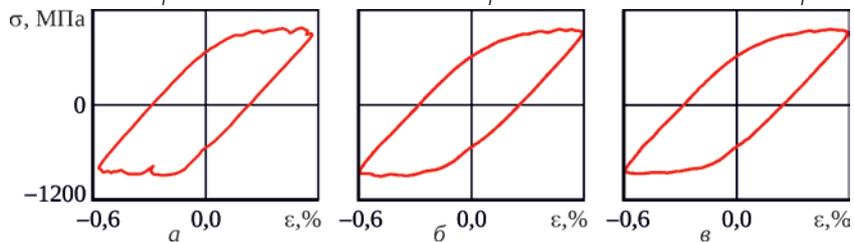
Результаты испытаний при  $850^{\circ}\text{C}$  и петли гистерезиса этих двух образцов свидетельствуют о том, что циклическая долговечность при МЦУ (жесткий цикл,  $R_{\sigma} = -1$ ) образцов с ориентацией <111> практически в 250 раз ниже, чем у образцов с ориентацией <001>. (Для справки,  $E(001) = 101,5$  ГПа;  $E(111) = 258,5$  ГПа.) Для сравнения на рис. 13 приведены результаты испытаний образца № 8 с КГО <001> при  $T = 850^{\circ}\text{C}$ ,



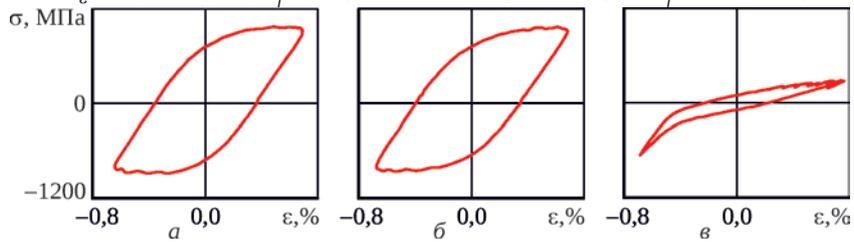
**Рис. 9.** Примеры изломов образцов (стрелками показаны очаги и причаговые зоны развития усталостных трещин):  
*a* – МЦУ, ВЖМ-4 с КГО <001>;  $N_f = 4934$  цикла при  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = 0$ ;  $\Delta\varepsilon = 1,5\%$ ; *б* – МЦУ, ВЖМ-5 с КГО <001>;  $N_f = 8892$  цикла при  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = 0$ ;  $\Delta\varepsilon = 1,3\%$ ; *в* – МЦУ, ВЖМ-5 с КГО <001>;  $N_f = 28671$  цикл при  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = -1$ ;  $\Delta\varepsilon = 1,3\%$ ; *г* – МнЦУ, ВЖМ-5 с КГО <001>;  $N_f = 3742923$  цикла при  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\sigma = 0,1$ ;  $\Delta\sigma = 450$  МПа; *д* – МЦУ, ВЖМ-5 с КГО <001>;  $N_f = 2211$  циклов при  $T = 1050^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = 0$ ;  $\Delta\varepsilon = 1,0\%$ ; *е* – МнЦУ, ВЖМ-5 с КГО <001>;  $N_f = 1593160$  циклов при  $T = 1050^\circ\text{C}$ ;  $\Delta\sigma = 405$  МПа



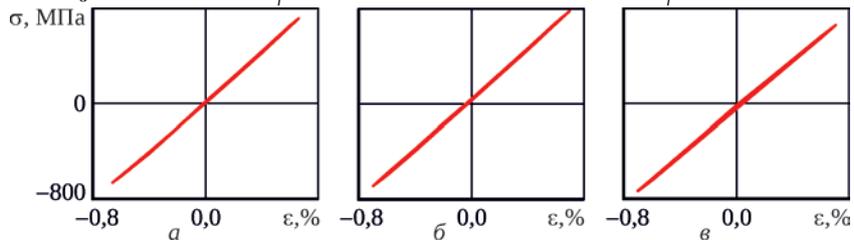
**Рис. 10.** Примеры изломов образцов сплава СЛЖС-3 с КГО <001> после испытаний на МЦУ ( $R_\varepsilon = 0$ ) при  $T = 850^\circ\text{C}$  (стрелками показаны квадратные фасетки): *a* –  $N_f = 4147$  циклов;  $\Delta\varepsilon = 1,4\%$ ; *б* –  $N_f = 8484$  цикла;  $\Delta\varepsilon = 1,2\%$ ; *в* –  $N_f = 23906$  циклов;  $\Delta\varepsilon = 1,0\%$



**Рис. 11.** Сплав ВЖМ-5 с КГО <111>, образец № 14. Эволюция петель гистерезиса в процессе испытаний на МЦУ при  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = -1$ ;  $\Delta\varepsilon = 1,2\%$ ;  $N_f = 57$  циклов: *a* – 1-й цикл; *б* – цикл  $N_f/2 = 29$ ; *в* – цикл  $N_f - 1 = 56$



**Рис. 12.** Сплав ВЖМ-5 с КГО <111>, образец № 15. Эволюция петель гистерезиса в процессе испытаний на МЦУ при  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = -1$ ;  $\Delta\varepsilon = 1,4\%$ ;  $N_f = 76$  циклов: *a* – 1-й цикл; *б* – цикл  $N_f/2 = 39$ ; *в* – цикл  $N_f - 1 = 75$



**Рис. 13.** Сплав ВЖМ-5 с КГО <001>, образец № 8. Эволюция петель гистерезиса в процессе испытаний на МЦУ при  $T = 850^\circ\text{C}$ ;  $R_\varepsilon = -1$ ;  $\Delta\varepsilon = 1,4\%$ ;  $N_f = 19082$  цикла: *a* – 1-й цикл; *б* – цикл  $N_f/2 = 9541$ ; *в* – цикл  $N_f - 1 = 19081$  цикл

$R_e = -1$  с таким же размахом деформации ( $\Delta\varepsilon = 1,4\%$ ), как и для образца № 15 с КГО  $\langle 111 \rangle$ . Поэтому для изучения закономерностей кристаллографической анизотропии МЦУ при жестком нагружении монокристаллов никелевых сплавов необходимо проведение дополнительных испытаний монокристаллических образцов с аксиальными кристаллографическими ориентациями  $\langle 011 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  при 850 и 1050°C.

## Заключение

В результате экспериментального исследования МЦУ (жесткий цикл) и МнЦУ при температурах 850...1050°C монокристаллических образцов с КГО  $\langle 001 \rangle$  из сплавов ВЖМ-4 и ВЖМ-5 показано, что МЦУ описывает экспоненциальная зависимость числа циклов до разрушения от размаха деформации в диапазоне долговечностей до  $5 \cdot 10^4$  циклов. МнЦУ, в отличие от МЦУ, при температурах 850...1050°C описывает степенная зависимость числа циклов до разрушения от размаха деформации в диапазоне долговечностей до  $2 \cdot 10^7$  циклов. Определены численные значения коэффициентов этих зависимостей.

Полученные результаты показывают, что уравнение Мэнсона не может быть использовано при оценке МЦУ монокристаллов сплавов ВЖМ-4 в КГО  $\langle 001 \rangle$  и ВЖМ-5 в КГО  $\langle 001 \rangle$  для исследованного диапазона температур и области циклической долговечности.

## Литература

1. Cowles В.А. High cycle fatigue in aircraft gas turbine – an industry perspective // Int. Journal of Fracture, 1996. No. 80. P. 147–163.
2. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Епишин А.И. Влияние кристаллографической ориентации на прочностные характеристики монокристаллов никелевого жаропрочного сплава. Научные труды МАТИ, 2005. Вып. 8. С. 22–27.
3. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Голубовский Е.Р. и др. Механические свойства монокристаллов никелевого жаропрочного сплава, содержащего рений и рутений. Деформация и разрушение материалов, 2008. № 11. С. 26–35.
4. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 464 с.
5. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л. Температурно-временная зависимость анизотропии характеристик длительной прочности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов. Проблемы прочности, 2002. № 2. С. 5–19.
6. Голубовский Е.Р., Жуков Н.Д. Экспериментальное исследование многоциклового усталости монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационное двигателестроение, 2006. Вып. 4 Проблемы конструкционной прочности современных ГТД. С. 62–70.
7. Толорай В.Н., Петухов А.Н., Колотников М.Е. и др. Некоторые особенности формирования монокристаллических отливок на примере безуглеродистого сплава ВЖМ-5 // Вестник двигателестроения, 2011. № 2. С. 234–238.
8. ГОСТ 25.502–79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Издательство стандартов, 1986. 34 с.
9. ASTM E606 / E606M-12, Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing // ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. www.astm.org
10. ASTM E466-15, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org
11. Рекомендательный циркуляр № РЦ-АП-33.15-1 Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов. М.: Авиаиздат, 2013. 38 с.

Показано, что коэффициент асимметрии по напряжениям  $R_\sigma$  при постоянном  $R_\varepsilon = 0$  и  $T = 850^\circ\text{C}$  меняется незначительно, а при  $T = 1050^\circ\text{C}$  – примерно в два раза.

Результаты испытаний на МЦУ и МнЦУ не подтверждают существование единой кривой усталости (МЦУ + МнЦУ) для монокристаллов сплава ВЖМ-5 в кристаллографическом направлении  $\langle 001 \rangle$  по деформациям и по напряжениям при температурах 850 и 1050°C; как частный случай для монокристаллов сплава ВЖМ-5 можно рассматривать единую кривую (МЦУ + МнЦУ) только по размахам деформаций для температуры 1050°C.

Предварительные результаты испытаний двух монокристаллических образцов из сплава ВЖМ-5 с аксиальной КГО  $\langle 111 \rangle$  свидетельствуют о том, что циклическая долговечность при МЦУ (жесткий цикл,  $R_e = -1$ ) образцов с ориентацией  $\langle 111 \rangle$  значительно ниже (примерно в 250 раз), чем у образцов с ориентацией  $\langle 001 \rangle$ .

Эти результаты являются необходимым аргументом для проведения детальных испытаний на МЦУ (жесткий цикл с  $R_e = 0$ ,  $R_e = -1$ ) и МнЦУ монокристаллических образцов с аксиальными кристаллографическими ориентациями  $\langle 011 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  при температурах 850 и 1050°C.

Авторы признательны М.А. Розанову (ЦИАМ) за результаты оценки КГО образцов.

- 
12. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей / под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Балашовой. М.: Машиностроение, 1981. 222 с.
  13. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003. 254 с.
  14. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. и др. Малоцикловая усталость жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // Деформация и разрушение материалов, 2009. № 8. С. 41–48.
  15. Литейный никелевый жаропрочный сплав // Патент РФ № 2446221 – 2012 г., Бюллетень № 9, 2012.
  16. Голубовский Е.Р., Артамонов М.А., Волков М.Е. и др. Усталость монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ВЖМ-5 при высоких температурах // Технология легких сплавов, 2016. № 3. С. 83–88.

## References

1. Cowles B.A. High cycle fatigue in aircraft gas turbine – an industry perspective // Int. Journal of Fracture, 1996. No. 80. P. 147–163.
2. Golubovsky E.R., Svetlov I.L., Epishin A.I. Vliianie kristallograficheskoi orientatsii na prochnostnye kharakteristiki monokristallov nikellevogo zharoprochnogo splava [Crystallographic orientation influence at strength characteristics of nickel heat-resistant alloy monocrystal]. Nauchnye trudy MATI, 2005. Issue 8. P. 22–27.
3. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Golubovsky E.R., Khvatsky K.K. i dr. Mekhanicheskie svoistva monokristallov nikellevogo zharoprochnogo splava, sodержashchego renii i rutenii [Mechanical properties of nickel heat-resistant alloy monocrystal comprising (with) rhenium and ruthenium]. Deformatsiia i razrushenie materialov, 2008. No. 11. P. 26–35.
4. Kablov E.N., Golubovsky E.R. Zharoprochnost' nikellevykh spлавov [High-temperature strength of nickel alloy]. Moscow: Mashinostroenie, 1998. 464 p.
5. Golubovsky E.R., Svetlov I.L. Temperaturno-vremennaiia zavisimost' anizotropii kharakteristik dlitel'noi prochnosti monokristallov nikellevykh zharoprochnykh spлавov [Temperature-time relationship of long-term (long-time) strength characteristic anisotropy of nickel heat-resistant alloy monocrystal]. Problemy prochnosti, 2002. No. 2. P. 5–19.
6. Golubovsky E.R., Zhukov N.D. Eksperimental'noe issledovanie mnogotsiklovoi ustalosti monokristallov zharoprochnykh nikellevykh spлавov. [High-cycle fatigue experimental investigation of nickel heat-resistant alloy monocrystal]. Voprosy aviatsionnoi nauki i tekhniki. Seria Aviatsionnoe dvigatelestroenie, 2006. Issue 4 Problemy konstruksionnoi prochnosti sovremennykh GTD. P. 62–70.
7. Toloraiia V.N., Petukhov A.N., Kolotnikov M.E. i dr. Nekotorye osobennosti formirovaniia monokristallicheskiikh otlivok na primere bezuglerodistogo splava VZhM-5 [Some specificity (peculiarity) of monocrystalline ingot forming for example carbon-free alloy VGM-5]. Vestnik dvigatelestroeniia, 2011. No. 2. P. 234–238.
8. GOST 25.502–79 Raschety i ispytaniia na prochnost' v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytaniia metallov. Metody ispytaniia na ustalost' [Calculating and strength test on engineering (mechanical engineering, engineering industry). Mechanical test methods of metal. Fatigue test methods]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1986. 34 p.
9. ASTM E606 / E606M-12, Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing // ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. www.astm.org
10. ASTM E466-15, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org
11. Rekomendatel'nyi tsirkuliar № RTs-AP-33.15-1 Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniiu raschetnykh znachenii kharakteristik konstruksionnoi prochnosti metallicheskiikh materialov [Methodical recommendation by definition of calculated metal materials structural strength characteristic]. Moscow: Aviaizdat, 2013. 38 p.
12. Konstruksionnaia prochnost' materialov i detalei gazoturbinykh dvigatelei [Structural strength of gas turbine engine materials and parts]. Yu.A. Birger, B.F. Balashova (ed.). Moscow: Mashinostroenie, 1981. 222 p.
13. Terent'ev V.F. Ustalost' metallicheskiikh materialov [Metal materials fatigue]. Moscow: Nauka, 2003. 254 p.
14. Golubovsky E.R., Svetlov I.L., Petrushin N.V. i dr. Malotsiklovaia ustalost' zharoprochnykh nikellevykh spлавov pri povyshennykh temperaturakh. Deformatsiia i razrushenie materialov [Low-cycle fatigue of nickel heat-resistant alloys at higher temperature. Deflection and failure of materials], 2009. No. 8. P. 41–48.
15. Liteinyi nikellevyi zharoprochnyi spлав [Castable nickel heat-resistant alloy]. Patent RF № 2446221. 2012, Biulleten' № 9, 2012.
16. Golubovsky E.R., Artamonov M.A., Volkov M.E. i dr. Ustalost' monokristallov zharoprochnogo nikellevogo splava VZHM-5 pri vysokikh temperaturakh. Tekhnologiiia legkiikh spлавov [Fatigue of nickel heat-resistant alloy monocrystal VZHM-5 at high temperature. Light alloy technology], 2016. No. 3. P. 83–88.