

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-97-110

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО СПЛАВА ВЖ175

И.А. Ходинев¹, М.А. Горбовец¹, С.А. Монин¹, П.В. Рыжков¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Исследована малоцикловая усталость при «жестком» и «мягком» циклах нагружения жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175 при комнатной и двух эксплуатационных температурах и трех коэффициентах асимметрии. Испытания проведены при синусоидальном цикле нагружения с частотой 1 Гц. Проведено сопоставление напряжений при «мягком» и «жестком» циклах нагружения, а также сравнение кривой усталости и априорных кривых, полученных с использованием характеристик кратковременной прочности.

Ключевые слова: малоцикловая усталость (МЦУ), жаропрочный сплав, деформируемый сплав, никелевый сплав, уравнение Баскина–Мэнсона–Кохфина, прогнозирование характеристик сопротивления усталости, коэффициент асимметрии

Для цитирования: Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А., Рыжков П.В. Исследование режимов синтеза поддерживающих структур деталей, получаемых методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-97-110.

Scientific article

LOW-CYCLE FATIGUE AT ELEVATED TEMPERATURES OF HEAT-RESISTANT NICKEL-BASED ALLOY MANUFACTURED BY SELECTIVE LASER MELTING

Ivan A. Hodinev¹, Mikhail A. Gorbovets¹, Sergey A. Monin¹, Petr V. Ryzhkov¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: Low-cycle fatigue has been investigated under a «hard» loading cycle and under a «soft» loading cycle of a heat-resistant deformable VZh175 alloy at room and two operating temperatures at three asymmetry coefficients. The tests were carried out at a sinusoidal loading cycle with a frequency of 1 Hz. Comparison of stresses at «soft» and «hard» loading cycles is carried out. A comparison of the fatigue curve and a priori curves obtained using the characteristics of short-term strength is carried out.

Keywords: low-cycle fatigue (LCF), high-temperature alloy, wrought alloy, nickel alloy, Basquin–Manson–Coffin equation, prediction of fatigue resistance characteristics, asymmetry coefficient

For citation: Hodinev I.A., Gorbovets M.A., Monin S.A., Ryzhkov P.V. Low-cycle fatigue at elevated temperatures of heat-resistant nickel-based alloy manufactured by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-97-110.

Введение

Жаропрочные никелевые сплавы активно используют при производстве рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей (ГТД), а также лопаток турбин стационарных газотурбинных установок (ГТУ), поскольку эти сплавы обладают соответствующими характеристиками прочности в эксплуатационных условиях. Разработка жаропрочных сплавов на основе никеля является актуальной задачей и связана с требованием

повышения температурной работоспособности и сохранением физико-механических свойств материалов при воздействии различных факторов [1–10]. Исследуемый жаропрочный сплав на основе никеля используют для изготовления дисков турбин, а также других деталей ротора ГТД и ГТУ.

Для деталей, подверженных циклическому нагружению, определяют характеристики мало- и многоциклового усталости. Малоцикловая усталость (МЦУ) характеризуется напряжениями, превышающими предел текучести материала. В процессе проведения испытаний на МЦУ контролируют один из параметров – размах напряжения или полной деформации за цикл. Контролируемый параметр остается неизменным на протяжении всего испытания, а второй параметр меняется. Нагружение при контроле деформации называется «жестким», а при контроле нагрузки – «мягким».

В данной работе определены свойства сплава ВЖ175 при МЦУ как при «жестком», так и «мягком» нагружении при трех коэффициентах асимметрии цикла. После проведения испытаний определены пределы выносливости и получены характеристики рассеяния экспериментальных значений, а также проанализированы зависимости этих величин от температуры испытания и коэффициентов асимметрии. Проведено сопоставление экспериментальных значений долговечности с априорными деформационными кривыми, спрогнозированными на основе характеристик кратковременной прочности, а также сравнение напряжений, задаваемых при «мягком» цикле нагружения, с напряжениями, возникающими при «жестком» цикле нагружения на одинаковых уровнях долговечности.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследование материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5].

Материалы и методы

Исследуемый сплав ВЖ175 на основе никеля относится к классу дисперснотвердеющих. Образцы из сплава получены после вакуумно-индукционной выплавки с переплавом в вакуумной дуговой печи, изотермической штамповкой на воздухе в несколько переходов и по стандартной термической обработке для данного материала (закалки и двойного старения) [11–13].

Испытания на МЦУ проведены в соответствии с ГОСТ 25.502–79 [14] и ASTM E606 [15]. При этих испытаниях использованы гладкие цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 5 мм и длиной рабочей части 15 мм, соответствующие требованиям ASTM E606. Испытания проведены на сервогидравлическом универсальном испытательном оборудовании серии LFV-100 фирмы Walter+Bai. Контроль полной деформации осуществлен с помощью высокотемпературного экстензометра с керамическими щупами. Поддержание заданной температуры испытаний осуществлялось при помощи трехзонных электрических печей [16].

Образцы испытывали при температурах 20; 650 и 750 °С. При одной температуре и одном коэффициенте асимметрии испытано от 15 до 25 образцов на нескольких уровнях амплитуд деформации. Испытания проводили при трех коэффициентах асимметрии (R), равных 0; 0,5; –1, синусоидальной форме цикла с частотой нагружения $f = 1$ Гц как для «мягкого», так и для «жесткого» цикла нагружения. При проведении испытаний определяли число циклов до разрушения N_p . Для испытаний при «жестком» цикле регистрировали напряжения в течение всего испытания – производили запись петель гистерезиса. Критериями окончания испытания являлись:

- падение напряжения более чем на 50 %;
- разделение образца на две части.

Результаты и обсуждение

Для аппроксимации зависимости числа циклов до разрушения от заданной деформации или заданного напряжения, в соответствии с рекомендациями РЦ АП-33.15-1 [17], могут использоваться степенная и экспоненциальная модели:

$$N_f = A \cdot \Delta \varepsilon^B, \quad N_f = C \cdot \Delta \sigma^D, \quad (1)$$

$$N_f = \alpha \cdot \exp(\beta \Delta \varepsilon), \quad N_f = \gamma \cdot \exp(\delta \Delta \sigma), \quad (2)$$

где N_f – число циклов до разрушения; $\Delta \varepsilon$ – размах полной деформации; $\Delta \sigma$ – размах напряжения; $A, B, C, D, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты.

В процессе обработки результатов испытаний выявлено, что для большинства испытаний аппроксимация уравнением (1) характеризуется меньшим среднеквадратичным отклонением (СКО) экспериментальных результатов от линии регрессии [17]:

$$S(\lg N) = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\lg N_i - \overline{\lg N_i})^2}, \quad (3)$$

где n – количество экспериментальных точек; $\lg N_i$ – экспериментальные логарифмы долговечностей; $\overline{\lg N_i}$ – логарифмы долговечностей, определенные по регрессионной зависимости для заданного уровня напряжения или деформации.

Поэтому для аппроксимации экспериментальных данных необходимо использовать степенную модель (1). После логарифмирования обеих частей уравнения (1) получена линейная зависимость

$$\lg N_f = a + b \cdot \lg \Delta \varepsilon; \quad \lg N_f = c + d \cdot \lg \Delta \sigma, \quad (4)$$

где a, b, c, d – коэффициенты регрессии.

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных, полученных при девяти режимах испытаний (трех температурах: 20; 650 и 750 °С; трех коэффициентах асимметрии R : 0; 0,5; –1), построены линии средних значений $\lg N_f$, соответствующих вероятности разрушения 50 % (рис. 1 и 2). Определены также коэффициенты линейной регрессии a и b , средние значения предела МЦУ на базе 10^4 циклов и СКО: табл. 1 – для «жесткого» цикла нагружения; табл. 2 – для «мягкого» цикла нагружения.

Таблица 1

Параметры линии регрессии при «жестком» цикле нагружения

Температура испытания, °С	Коэффициент асимметрии R	Коэффициенты линейной регрессии		Предел выносливости $\Delta \varepsilon$, % (на базе $N = 10^4$ циклов)	СКО по формуле (3)
		a	b		
20	–1	5,70	–3,38	1,00	0,263
	0	5,80	–3,96	0,90	0,185
	0,5	5,34	–2,8	0,94	0,107
650	–1	8,4	–9,42	0,96	0,509
	0	7,51	–8,02	0,88	0,523
	0,5	7,91	–9,27	0,84	0,388
750	–1	7,14	–7,32	0,86	0,385
	0	7,70	–8,85	0,84	0,439
	0,5	7,10	–7,99	0,78	0,551

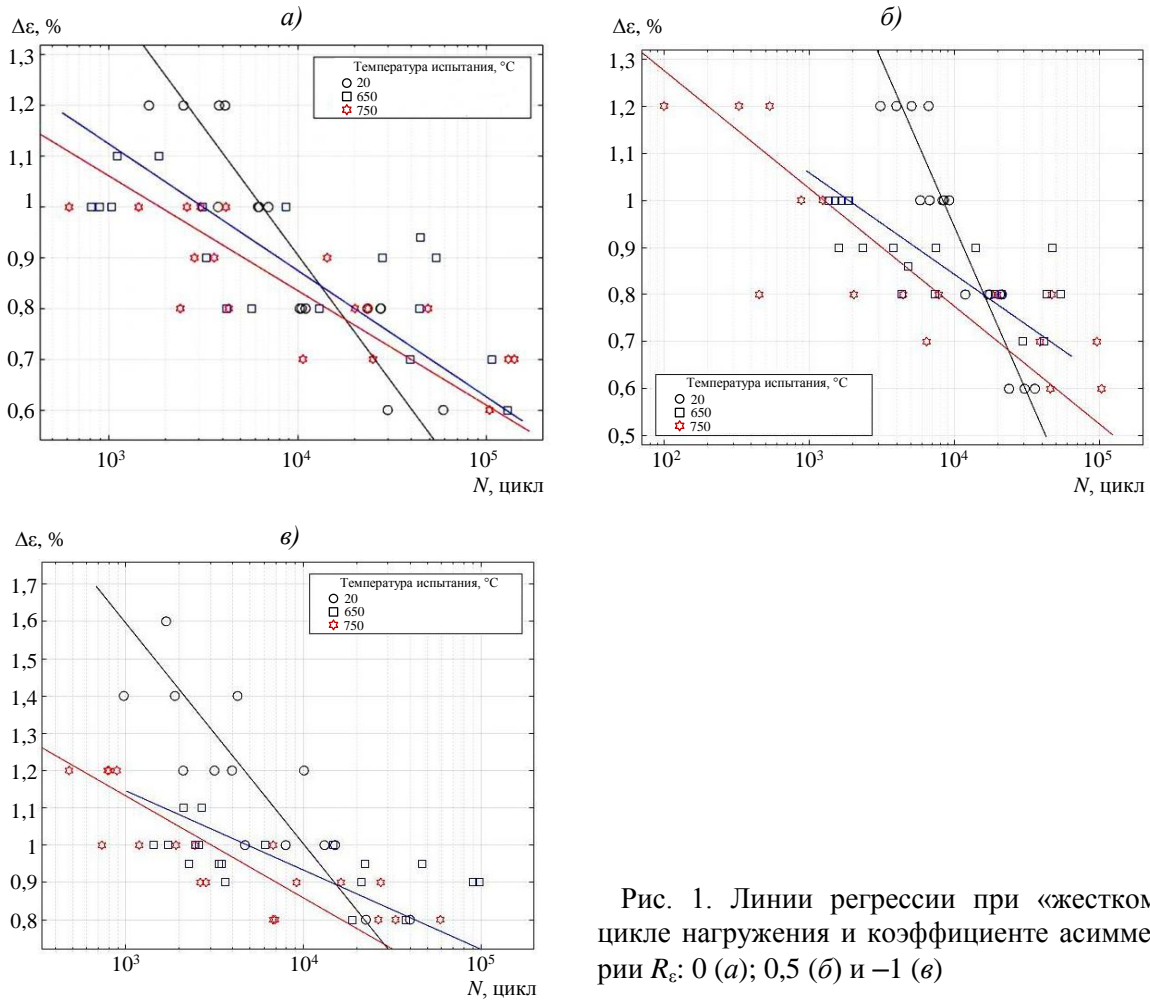


Рис. 1. Линии регрессии при «жестком» цикле нагружения и коэффициенте асимметрии R_ϵ : 0 (а); 0,5 (б) и -1 (в)

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных после испытаний при «жестком» цикле нагружения установлено следующее.

– Для всех трех исследуемых коэффициентов асимметрии повышение температуры вызывает снижение предела выносливости на базе 10^4 циклов:

- на 3–10 % – при повышении температуры испытания с 20 до 650 °C;
- на 4–10 % – при повышении температуры испытания с 650 до 750 °C.

– Для всех трех температур при сравнении размахов деформации $\Delta \epsilon$ наибольшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов характеризуется коэффициент асимметрии $R_\epsilon = -1$. Наименьшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов для комнатной температуры испытаний характеризуется коэффициент асимметрии $R_\epsilon = 0$, а для эксплуатационных температур – коэффициент асимметрии $R_\epsilon = 0,5$.

– Пределы выносливости на базе 10^4 циклов для комнатной и эксплуатационных температур отличаются не более чем на 15 %, однако коэффициент наклона линии регрессии b при увеличении температуры до эксплуатационной возрастает в 2–3 раза. Это свидетельствует о том, что при рассмотрении больших баз разница пределов выносливости имеет тенденцию к увеличению. Приведенные графические представления зависимостей подтверждают это утверждение.

– Среднеквадратичное отклонение, характеризующее рассеяние экспериментальных значений, значительно увеличивается при эксплуатационных температурах по сравнению с комнатной. Зависимость СКО от коэффициента асимметрии не прослеживается.

Таблица 2

Параметры линии регрессии при «мягком» цикле нагружения

Температура испытания, °С	Коэффициент асимметрии R	Коэффициенты линейной регрессии		Предел выносливости $\Delta\sigma$, МПа (на базе $N = 10^4$ циклов)	СКО по формуле (3)
		a	b		
20	-1	14,82	-0,011	1970	0,827
	0	7,50	-0,005	1320	0,104
	0,5	12,86	-0,024	800	1,040
650	-1	14,65	-0,012	1830	0,465
	0	12,10	-0,013	1220	0,451
	0,5	11,01	-0,021	715	0,505
750	-1	11,05	-0,009	1550	0,209
	0	11,98	-0,015	1050	0,268
	0,5	10,80	-0,027	500	0,362

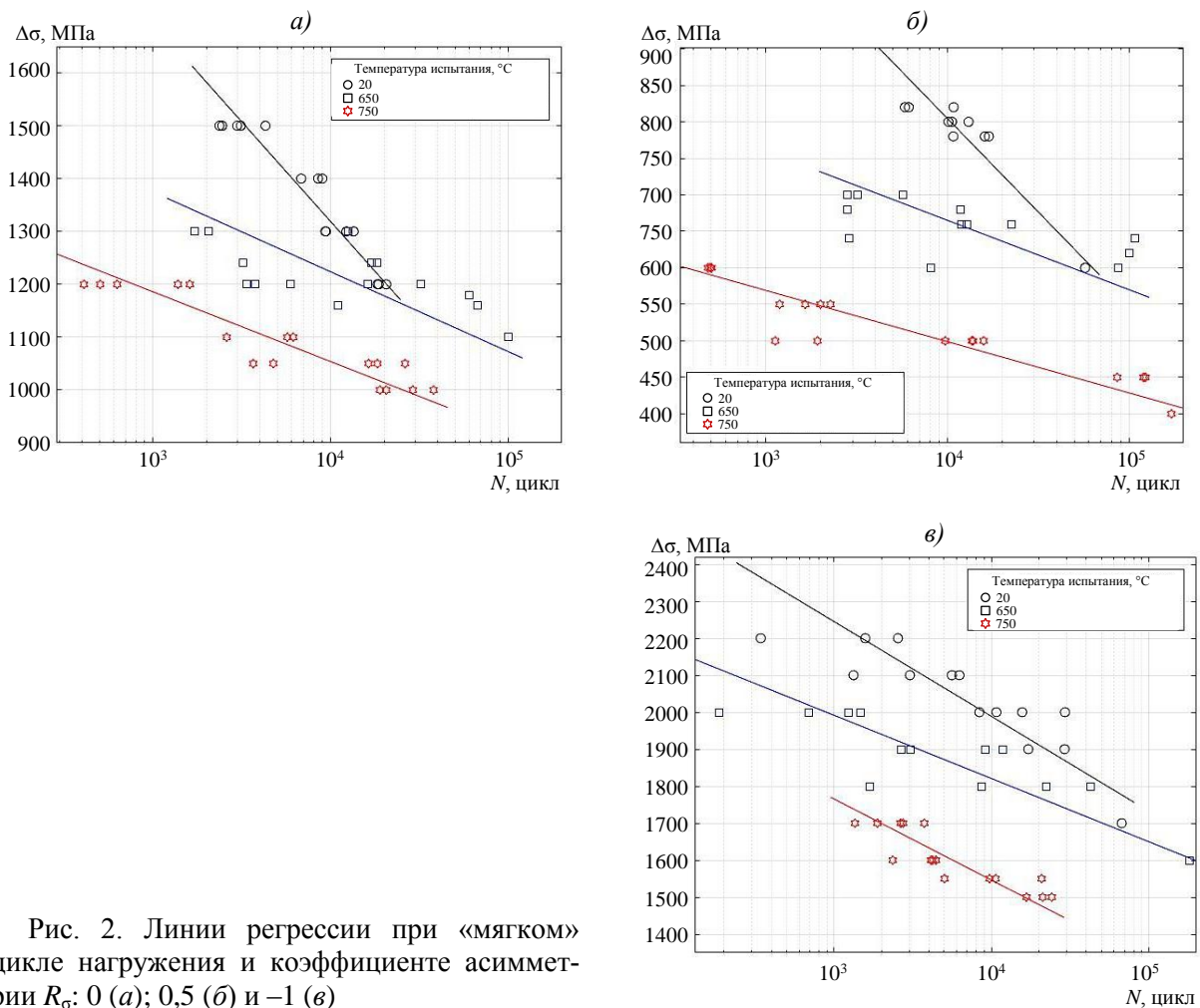


Рис. 2. Линии регрессии при «мягком» цикле нагружения и коэффициенты асимметрии R_c : 0 (а); 0,5 (б) и -1 (в)

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных после испытаний при «мягком» цикле нагружения установлено следующее.

– Для всех трех исследуемых коэффициентов асимметрии повышение температуры вызывает снижение предела выносливости на базе 10^4 циклов:

- на 5-10 % – при повышении температуры испытания с 20 до 650 °С;
- на 15–20 % – при повышении температуры испытания с 650 до 750 °С.
- Для всех трех температур при сравнении размахов напряжений $\Delta\sigma$ наибольшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов характеризуется коэффициент асимметрии $R_\sigma = -1$. При переходе к коэффициенту асимметрии $R_\sigma = 0$ предел выносливости снижается на ~30 %, а при переходе к $R_\sigma = 0,5$ – на 60 %.
- При всех трех исследуемых температурах коэффициент асимметрии $R_\sigma = 0,5$ характеризуется значительно бóльшим наклоном линии регрессии, чем другие коэффициенты асимметрии.
- Среднеквадратичное отклонение, характеризующее рассеяние экспериментальных значений, при температуре 650 °С в 2 раза больше, чем при температуре 750 °С.

Испытания при «жестком» цикле нагружения проведены при регистрации напряжений. Исследования поведения материала при «жестком» нагружении [12] показали, что максимальное и минимальное напряжения бóльшую часть испытания практически не меняются, поэтому для каждого испытания напряжения при количестве циклов $N_f/2$ зафиксированы как характерные для соответствующего уровня размаха деформации.

При «жестком» цикле нагружения при коэффициентах асимметрии $R_\varepsilon = 0$ и $R_\varepsilon = 0,5$ коэффициент асимметрии по медианным напряжениям R_σ (при числе циклов $N_f/2$) меняется в широком диапазоне, тогда как при $R_\varepsilon = -1$ коэффициент асимметрии по напряжениям тоже колеблется около значения $R_\sigma = -1$ (рис. 3). В связи с этим сопоставлены напряжения, возникающие при «жестком» цикле нагружения при коэффициенте асимметрии $R_\varepsilon = -1$, и напряжения, задаваемые при «мягком» цикле нагружения при коэффициенте асимметрии $R_\sigma = -1$ (рис. 4).

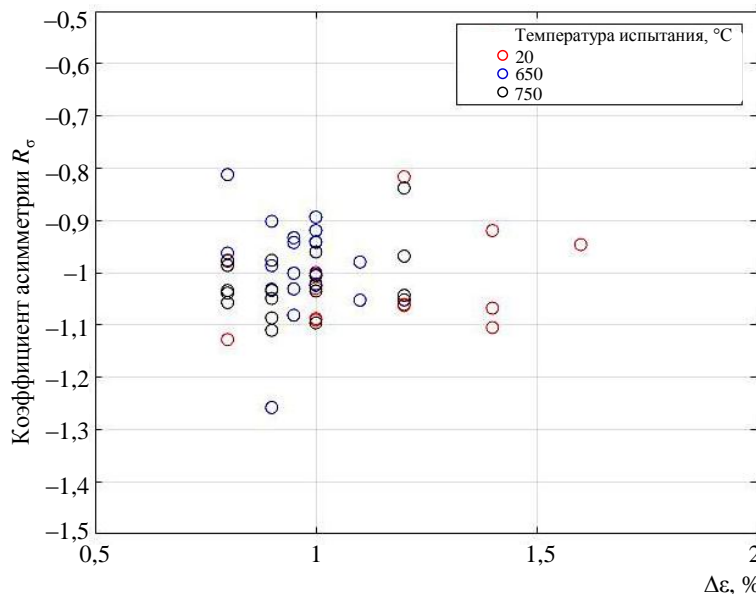


Рис. 3. Коэффициент асимметрии по медианным напряжениям R_σ при «жестком» цикле нагружения с коэффициентом асимметрии $R_\varepsilon = -1$

В результате сопоставления линий регрессии при «жестком» и «мягком» циклах нагружения установлено следующее:

- при комнатной и эксплуатационных температурах предел выносливости на базе 10^4 циклов, определенный по линии регрессии при «мягком» цикле нагружения,

больше на 2–6 %, чем предел, определенный при помощи регрессионного анализа медианных напряжений, возникающих при «жестком» цикле нагружения;

– при всех трех рассмотренных температурах линии регрессии, построенные по медианным напряжениям при «жестком» цикле нагружения, характеризуются бóльшим углом наклона, чем линии регрессии при «мягком» цикле нагружения.

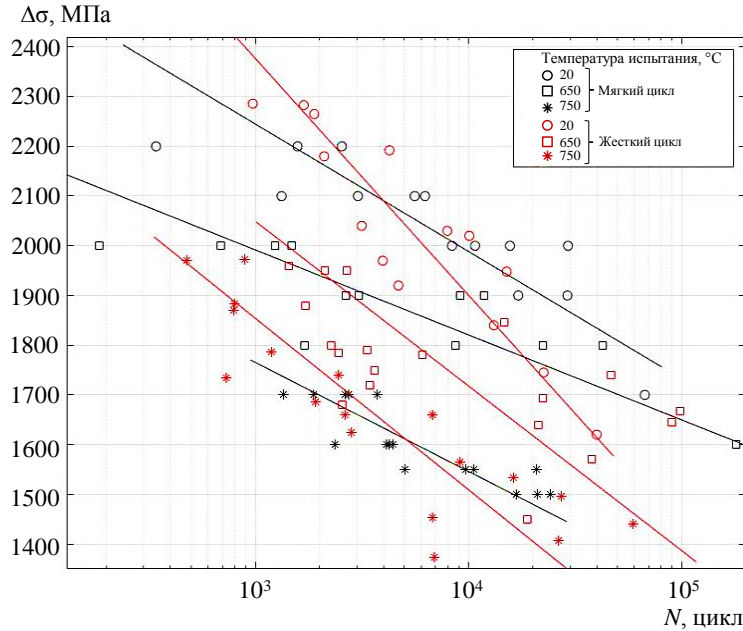


Рис. 4. Сопоставление напряжений при «жестком» и «мягком» циклах нагружения

Деформационные подходы, используемые для исследования усталости металлов, основываются на разделении амплитуды деформации на упругую (ϵ_{ae}) и пластическую (ϵ_{ap}) составляющие [18–21]:

$$\begin{aligned} \epsilon_{ae} &= \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (N_p)^b, \\ \epsilon_{ap} &= \epsilon'_f \cdot (N_p)^c. \end{aligned} \tag{5}$$

Уравнение Басквина–Мэнсона–Кохфина, связывающее амплитуду полной деформации и количество циклов до усталостного разрушения, имеет вид

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (N_p)^b + \epsilon'_f (N_p)^c, \tag{6}$$

где ϵ_a – амплитуда полной деформации; N_p – количество циклов до усталостного разрушения; σ'_f – коэффициент усталостной прочности; ϵ'_f – коэффициент усталостной пластичности; b – экспонента усталостной прочности; c – экспонента усталостной пластичности; E – модуль упругости.

Это выражение справедливо для случая нагружения с коэффициентом асимметрии $R_\epsilon = -1$. Существует ряд обобщений этого выражения на случай произвольного коэффициента асимметрии [22]. В данной работе используется выражение Смита–Уэстона–Топпера:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left(N_p \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1}{2b}} \right)^b + \varepsilon'_f \left(N_p \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1}{2b}} \right)^c, \quad (7)$$

где R – коэффициент асимметрии.

Прогнозирование усталостных свойств используют для планирования испытаний – оценки уровней нагружения, соответствующих долговечностям, которые интересны для испытателей. В данной работе рассмотрены три широко применяемых метода определения коэффициентов уравнения (5) для прогнозирования деформационных кривых усталости: метод универсальных наклонов Мэнсона, модифицированный метод универсальных наклонов Муралидхарана–Мэнсона и метод четырехточечной корреляции Мэнсона [23, 24].

Способы определения коэффициентов уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина, предложенные в вышеперечисленных методах, представлены в табл. 3, где σ_B – предел прочности; ε_f – пластическая деформация при статическом разрушении; ψ – относительное сужение.

Таблица 3

Методы определения коэффициентов уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина

Название метода	Выражения для коэффициентов уравнения (7)
Метод универсальных наклонов Мэнсона [23]	$\sigma'_f = 1,9018\sigma_B; b = -0,12; c = -0,6;$ $\varepsilon'_f = 0,7579 \left[\ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right) \right]^{0,6}$
Модифицированный метод универсальных наклонов Муралидхарана–Мэнсона [24]	$\sigma'_f = 0,623E \left(\frac{\sigma_B}{E} \right)^{0,832}; b = -0,09; c = -0,56;$ $\varepsilon'_f = 0,019 \varepsilon_f^{0,155} \left(\frac{\sigma_B}{E} \right)^{-0,53}$
Метод четырехточечной корреляции Мэнсона [23]	$\sigma'_f = 1,25\sigma_f \cdot 2^b; \sigma_f \cong \sigma_B (1 + \varepsilon_f);$ $\varepsilon'_f = \frac{0,125}{20^c} \left[\ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right) \right]^{3/4};$ $b = \frac{\lg(0,36 \cdot \sigma_B / \sigma_f)}{5,6};$ $c = \frac{1}{3} \lg \frac{0,0066 - \sigma'_f (2 \cdot 10^4)^b / E}{0,239 \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right) \right\}^{3/4}}$

Спрогнозированные вышеперечисленными методами деформационные кривые построены для жаропрочного сплава ВЖ175. Характеристики, необходимые для построения прогнозируемых деформационных кривых усталости, получены при испытаниях на кратковременную прочность. Экспериментальные значения долговечностей, линии регрессии и спрогнозированные по результатам статических испытаний графики зависимостей долговечности от размаха деформации (априорные кривые) представлены на рис. 5.

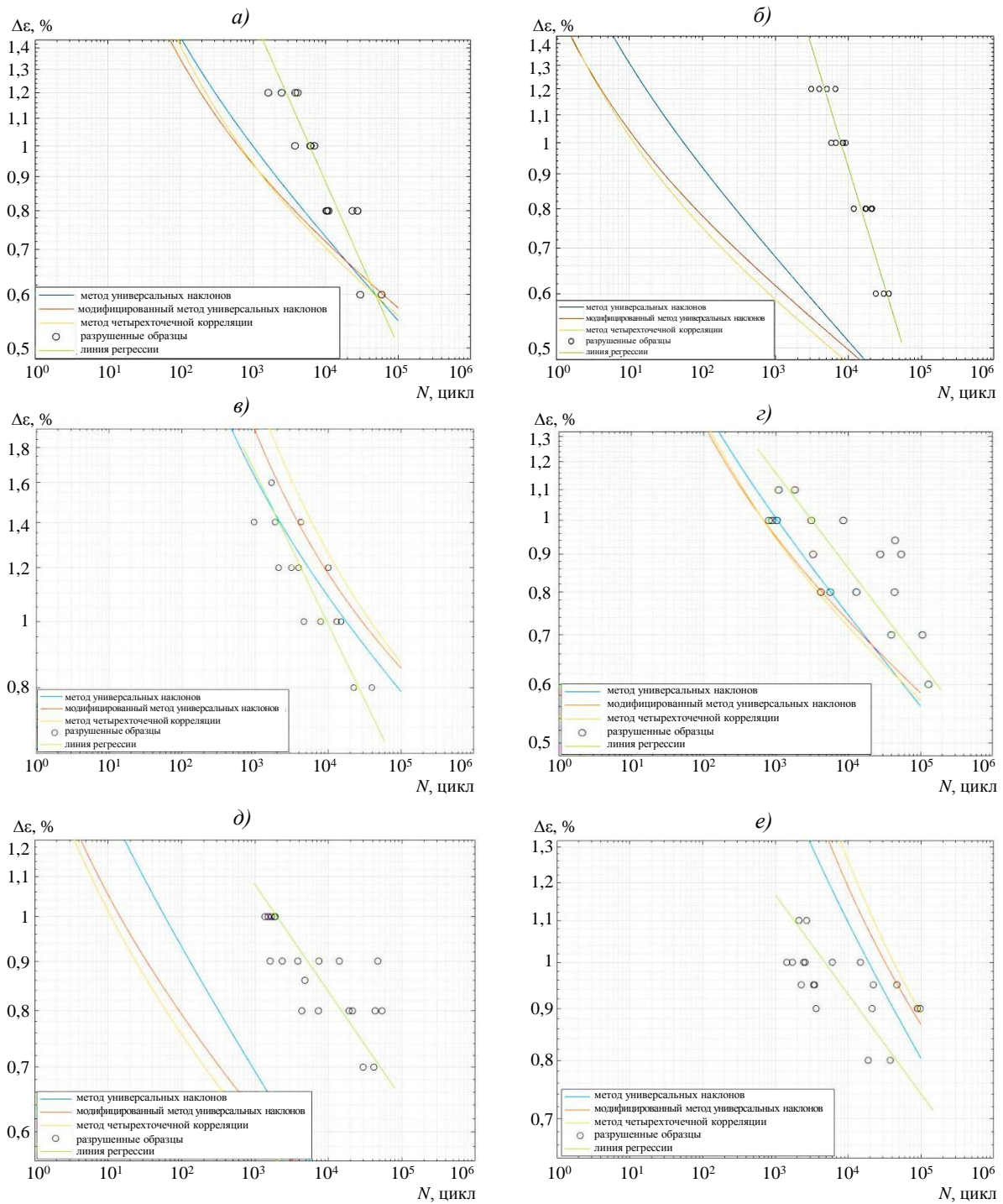


Рис. 5. Априорные кривые при температурах 20 (а-в) и 650 °С (z-e) и коэффициенте асимметрии R_ϵ : 0 (а, z); 0,5 (б, д) и -1 (в, e)

При коэффициенте асимметрии $R_\epsilon = -1$ априорные деформационные кривые при комнатной и эксплуатационных температурах характеризуются завышенными значениями долговечности относительно экспериментальных значений. При коэффициентах асимметрии $R_\epsilon = 0$ и $R_\epsilon = 0,5$ при комнатной и эксплуатационных температурах априорные деформационные кривые характеризуются заниженными значениями долговечности относительно экспериментальных результатов, причем при $R_\epsilon = 0,5$ априорные кривые расположены значительно дальше от экспериментальных точек по оси долговечности, чем при коэффициентах $R_\epsilon = 0$ и $R_\epsilon = -1$. Для всех случаев метод универсальных наклонов характеризуется наиболее близкой к экспериментальным данным априорной деформационной кривой.

Таким образом, можно заключить, что:

– рассмотренные методы прогнозирования применимы для грубой консервативной оценки усталостных свойств сплава ВЖ175 при $R = 0$ и для грубой неконсервативной оценки усталостных свойств сплава ВЖ175 при $R = -1$, но неприменимы для оценки таких свойств при $R = 0,5$;

– из трех рассмотренных методов прогнозирования метод универсальных наклонов Мэнсона характеризуется наиболее близкими к экспериментальным значениям априорными кривыми.

Заключения

В результате анализа и сопоставления результатов испытаний на МЦУ сделаны следующие выводы.

Для испытаний при «жестком» цикле нагружения:

– для всех трех исследуемых коэффициентов асимметрии повышение температуры вызывает снижение предела выносливости на базе 10^4 циклов: на 3–5 % – при повышении температуры испытания с 20 до 650 °С и на 4–5 % – при повышении температуры испытания с 650 до 750 °С;

– для всех трех температур при сравнении размахов деформации $\Delta\epsilon$ наибольшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов характеризуется коэффициент асимметрии $R_\epsilon = -1$. Наименьшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов при комнатной температуре испытаний характеризуется коэффициент асимметрии $R_\epsilon = 0$, а для эксплуатационных температур – коэффициент асимметрии $R_\epsilon = 0,5$;

– пределы выносливости на базе 10^4 циклов для комнатной и эксплуатационных температур отличаются не более чем на 15 %, однако коэффициент наклона линии регрессии b при увеличении температуры до эксплуатационной возрастает в 2–3 раза. Это свидетельствует о том, что при рассмотрении больших баз разница значений пределов выносливости имеет тенденцию к увеличению. Приведенные графические зависимости подтверждают данное утверждение.

Для испытаний при «мягком» цикле нагружения:

– для всех трех исследуемых коэффициентов асимметрии повышение температуры вызывает снижение предела выносливости на базе 10^4 циклов: на 10–15 % – при повышении температуры испытания с 20 до 650 °С и на 15–20 % – при повышении температуры испытания с 650 до 750 °С;

– для всех трех температур при сравнении размахов напряжений $\Delta\sigma$ наибольшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов характеризуется коэффициент асимметрии $R_\sigma = -1$. При переходе к коэффициенту асимметрии $R_\sigma = 0$ предел выносливости снижается на ~30 %, а при переходе к $R_\sigma = 0,5$ – на 60 %;

– при всех трех исследуемых температурах коэффициент асимметрии $R_\sigma = 0,5$ характеризуется значительно бóльшим наклоном линии регрессии, чем другие коэффициенты асимметрии.

При сопоставлении результатов испытаний при «мягком» и «жестком» циклах нагружения:

– при комнатной и повышенных температурах предел выносливости на базе 10^4 циклов, определенный по линии регрессии при «мягком» цикле нагружения, больше на 2–6 %, чем предел выносливости, определенный при помощи регрессионного анализа медианных напряжений, возникающих при «жестком» цикле нагружения.

При анализе априорных кривых:

– рассмотренные методы прогнозирования применимы для грубой консервативной оценки усталостных свойств сплава ВЖ175 при $R = 0$ и для грубой неконсервативной оценки – при $R = -1$, но неприменимы при $R = 0,5$;

– из трех рассмотренных методов прогнозирования метод универсальных наклонов Мэнсона характеризуется наиболее близкими к экспериментальным значениям априорными кривыми.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе γ' -фазы для лопаток ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.
3. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.
4. Оспенникова О.Г. Тенденции создания жаропрочных никелевых сплавов низкой плотности с поликристаллической и монокристаллической структурой (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 1 (40). С. 3–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-3-19.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. № 3. С. 47–54.
7. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Черкасова С.А., Волков М.Е. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // *Деформация и разрушение материалов*. 2009. № 8. С. 41–48.
8. Горбовец М.А., Базылева О.А., Беляев М.С., Ходинев И.А. Малоцикловая усталость монокристаллического интерметаллидного сплава типа ВКНА в условиях «жесткого» нагружения // *Металлург*. 2014. № 8. С. 111–114.
9. Ходинев И.А., Монин С.А. Анизотропия характеристик малоцикловой усталости монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Труды ВИАМ*. 2020. № 10 (92). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-97-105.
10. Zhong Z., Gu Y., Yuan Y. et al. On the low cycle fatigue behaviour of a Ni-based superalloy containing high Co and Ti contents // *Materials Science and Engineering*. 2012. Vol. A552. P. 434–443.

11. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 52–57.
12. Беляев М.С., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М. Изменение параметров упругопластического деформирования в процессе испытаний на МЦУ при жестком нагружении жаропрочного сплава ВЖ175 // *Труды ВИАМ*. 2015. № 12. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-4-4.
13. Ломберг Б.С., Шестакова А.А., Летников М.Н., Бакрадзе М.М. Влияние температуры и напряжений на характер наночастиц γ' -фазы в сплаве ВЖ175-ИД // *Труды ВИАМ*. 2019. № 12 (84). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-3-10.
14. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Изд-во стандартов, 1986. 34 с.
15. ASTM E606/ E606M-19. Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. American Society for Testing and Materials. 2018. 16 p.
16. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
17. Рекомендательный циркуляр РЦ-АП-33.15-1. Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов. М.: Авиаиздат, 2013. С. 32–33.
18. Трошенко В.Т., Хамаза Л.А. Деформационные кривые усталости сталей и методы определения их параметров. Сообщение 1. Традиционные методы // *Проблемы прочности*. 2010. № 6. С. 26–43.
19. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 2. Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Методики испытаний и обработки результатов // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.05.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
20. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
21. Radhakrishnan V.M. On bilinearity of the Coffin–Manson low-cycle fatigue relationship // *International Journal of Fatigue*. 1992. Vol. 14. No. 5. P. 305–311.
22. Norman E. Dowling. Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue // *Fatigue & Fracture of Engineering*. 2009. No. 32 (3). P. 163–179.
23. Manson S.S. Fatigue: a Complex Subject – Some Simple Approximations // *Experimental Mechanics – Journal of the Society for Experimental Stress Analysis*. 1965. No. 5 (7). P. 193–226.
24. Muralidharan U., Manson S.S. Modified Universal Slopes Equation for Estimation of Fatigue characteristics // *Journal of Engineering Materials and Technology – Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. 1988. No. 110. P. 55–58.

Reference

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Petrushin N.V., Visik E.M. Single-crystal nickel-based superalloy of a new generation with low-density. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Petrushin N.V. New single crystal heat-resistant intermetallic γ' -based alloy for GTE blades. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.

3. Petrushin N.V., Ospennikova O.G., Svetlov I.L. Single-crystal Ni-based superalloys for turbine blades of advanced gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.
4. Ospennikova O.G. Tendencies of development of heat-resistant nickel alloys of low density with polycrystalline and single-crystal structures (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 1 (40), pp. 3–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-3-19.
5. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S., Sidorov V.V. Priority directions of development of technologies for the production of heat-resistant materials for aircraft engine building. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2013, no. 3, pp. 47–54.
7. Golubovsky E.R., Svetlov I.L., Petrushin N.V., Cherkasova S.A., Volkov M.E. Low-cycle fatigue of single crystals of heat-resistant nickel alloys at elevated temperatures. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2009, no. 8, pp. 41–48.
8. Gorbovets M.A., Bazyleva O.A., Belyaev M.S., Khodinev I.A. Low-cycle fatigue of a single-crystal intermetallic alloy of the VKNA type under conditions of "hard" loading. *Metallurg*, 2014, no. 8, pp. 111–114.
9. Hodinev I.A., Monin S.A. Anisotropy of low cycle fatigue characteristics of single-crystal heat-resistant nickel alloys. *Trudy VIAM*, 2020, no. 10 (92), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 1, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-97-105.
10. Zhong Z., Gu Y., Yuan Y. et al. On the low cycle fatigue behaviour of a Ni-based superalloy containing high Co and Ti contents. *Materials Science and Engineering*, 2012, vol. A552, pp. 434–443.
11. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. High-temperature heat resisting nickel alloys for details of gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 52–57.
12. Belyayev M.S., Gorbovets M.A., Bakradze M.M. Change of parameters of elasto-plastic deformation for LCF testing Ni-base superalloy VZh175. *Trudy VIAM*, 2015, no. 12, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 1, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-4-4.
13. Lomberg B.S., Shestakova A.A., Letnikov M.N., Bakradze M.M. The influence of temperature and stresses on nature of nanosize γ' -phase in Ni-base superalloy VZh175-ID. *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 1, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-3-10.
14. State Standart 25.502–79. *Calculations and tests for strength in mechanical engineering. Methods for mechanical testing of metals. Fatigue test methods*. Moscow: Publishing house of Standards, 1986, 34 p.
15. ASTM E606/ E606M-19. *Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing*. American Society for Testing and Materials, 2018, 16 p.
16. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Ryzhkov P.V. Equipment for testing carrying out the strain-controlled low-cycle fatigue. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9 (69), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 01, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
17. Recommended circular RC-AP-33.15-1. *Guidelines for determining the design values of the characteristics of the structural strength of metallic materials*. Moscow: Aviaizdat, 2013. S. 32–33.
18. Troshchenko V.T., Khamaza L.A. Deformation curves of fatigue of steels and methods for determining their parameters. Communication 1. Traditional methods. *Problemy prochnosti*, 2010, no. 6, pp. 26–43.
19. Erasov V.S., Oreshko E.I. Tests for fatigue of metal materials (review). Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Methods of testing and processing of results. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 15, 2021). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-1-80-94.

20. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
21. Radhakrishnan V.M. On bilinearity of the Coffin–Manson low-cycle fatigue relationship. *International Journal of Fatigue*, 1992, vol. 14, no. 5, pp. 305–311.
22. Norman E. Dowling. Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering*, 2009, no. 32 (3), pp. 163–179.
23. Manson S.S. Fatigue: a Complex Subject – Some Simple Approximations. *Experimental Mechanics – Journal of the Society for Experimental Stress Analysis*, 1965, no. 5 (7), pp. 193–226.
24. Muralidharan U., Manson S.S. Modified Universal Slopes Equation for Estimation of Fatigue characteristics. *Journal of Engineering Materials and Technology – Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1988, no. 110, pp. 55–58.

Информация об авторах

Ходинев Иван Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Горбовец Михаил Александрович, заместитель начальника Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Монин Сергей Алексеевич, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Рыжков Петр Валерьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ivan A. Hodinev, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mikhail A. Gorbovets, Deputy Head of Testing Center, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Monin, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Petr V. Ryzhkov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 05.08.2021; одобрена после рецензирования 25.08.2021; принята к публикации 25.08.2021.

The article was submitted 05.08.2021; approved after reviewing 25.08.2021; accepted for publication 25.08.2021.