

УДК 620.178.35:669.245

М.А. Горбовец¹, И.А. Ходинев¹, П.В. Рыжков¹**МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО
СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-65-73

Приведены результаты усталостных испытаний при контроле полной деформации в условиях симметричного цикла нагружения и повышенной температуры. Рассмотрена взаимосвязь значений усталостных характеристик материала с учетом напряжений, пластической деформации и количества циклов до разрушения. Представлено сравнение деформационных кривых, построенных по экспериментальным данным, с деформационными кривыми, построенными оценочными методами. Показана связь уравнений Басквина–Мэнсона–Коффина и Рэмберга–Осгуда на примере полученных численных характеристик.

Ключевые слова: характеристики усталости, жаропрочные никелевые сплавы, технология селективного лазерного сплавления (СЛС), деформационный подход, уравнение Рэмберга–Осгуда, уравнение Басквина–Мэнсона–Коффина.

М.А. Gorbovets¹, I.A. Hodinev¹, P.V. Ryzhkov¹**LOW-CYCLE FATIGUE AT HIGH TEMPERATURES
OF HEAT-RESISTANT NICKEL-BASED ALLOY MANUFACTURED
BY SELECTIVE LASER MELTING**

The article gives the results of fatigue tests with controlled total deformation under the conditions of a symmetric loading cycle and high temperature. The relationship between the values of the material fatigue characteristics allowing for stresses, plastic deformation and the number of cycles to failure is considered. The deformation curves constructed from experimental data are compared with deformation curves constructed by judgmental methods. The relationship between the Baskquin–Manson–Coffin and Ramberg–Osgood equations is given using the obtained numerical characteristics as an example.

Keywords: fatigue characteristics, heat-resistant nickel-based alloys, selective laser melting technology (SLM), Strain Life Approach, the Ramberg–Osgood equation, Basquin–Manson–Coffin equation.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Малоцикловая усталость (МЦУ) входит в перечень основных характеристик по конструкционной прочности сплавов, которые используются при расчетах напряженно-деформированного состояния и определении ресурсных параметров деталей и узлов авиационных ГТД.

Одним из наиболее актуальных способов создания трехмерных изделий является метод селективного лазерного сплавления (СЛС). Эта приоритетная технология позволяет формировать объемные изделия из металлических порошков и их композиций с пористостью 0–3%, что сопоставимо с металлическими изделиями, изготавливаемыми традиционными методами. Внедрение данной технологии способствует переходу отечественной промышленности к шестому технологическому укладу [1–4].

Проведение усталостных испытаний образцов, изготовленных по аддитивным технологиям,

является неотъемлемой частью процесса разработки технологии синтеза деталей. Развитие аддитивных технологий требует большого количества исследований, которые объединены одним стандартом или методом. Свойства материала, получаемые по результатам циклического нагружения, представляют практическую ценность в области расчетного и экспериментального моделирования нагружения элементов конструкций. Вопросы экспериментального изучения закономерностей циклического деформирования материалов привлекают внимание исследователей в связи с особенностями их использования в различных моделях материалов для решения задач повышения ресурса и оптимизации конструкций. В современной отечественной практике [5–8] в области исследований много- и малоцикловой усталости довольно распространенным методом описания характеристики долговечности является представление ее как функции от

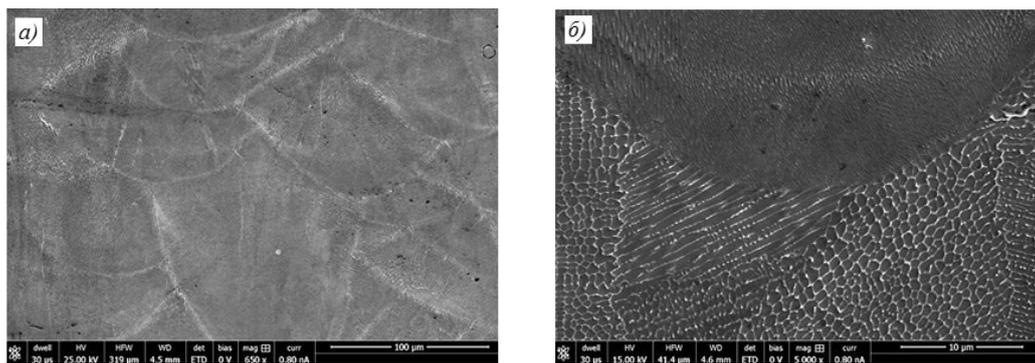


Рис. 1. Микроструктура (а – $\times 650$, б – $\times 5000$) сплава ВЖ159 после селективного лазерного сплавления

параметров цикла нагружения. На этапе проектирования изделий, полученных СЛС, происходит процесс прогнозирования МЦУ с определением наиболее опасных мест – критических плоскостей, в которых с наибольшей вероятностью могут появляться и распространяться усталостные трещины. Современное автоматизированное программное обеспечение конечно-элементного моделирования основывается на собственных алгоритмах, в которых соотношения воздействующих параметров и соответствующих откликов взяты из известных моделей материалов. Интерпретация результатов множества исследований [9–13] жаропрочных материалов за рубежом основывается на деформационном подходе (strain-life approach). Деформационный подход в области усталости предусматривает использование соотношений Мэнсона–Коффина и Рэмберга–Осгуда. В пункте Х1 (функциональные соотношения) стандарта ASTM E606 и в пункте 4.3 (результаты испытаний) стандарта ISO 12106-2017 в качестве переменных приведены следующие характеристики:

- $\Delta\sigma$ (размах истинных напряжений);
- $\Delta\varepsilon$ (размах истинных деформаций);
- $\Delta\varepsilon_p$ (размах пластической деформации);
- N_f (число циклов до разрушения),

а в качестве постоянных:

- n' (показатель циклического упрочнения);
- K' (коэффициент циклической прочности);
- b (показатель усталостной прочности);
- c (показатель усталостной пластичности);
- σ'_f (коэффициент усталостной прочности);
- ε'_f (коэффициент усталостной пластичности);
- E (модуль упругости).

Корреляция и оценка вышеперечисленных характеристик с позиции других свойств является актуальной задачей для рассматриваемого сплава. 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») [1].

Материалы и методы

Селективное лазерное сплавление (СЛС) из металлопорошковой композиции свариваемого

никелевого сплава ВЖ159 осуществлялось на установке Concept Laser M2 cusing в среде азота, вырабатываемого штатным генератором, и аргона (высший сорт, ГОСТ 10157–79). Сырьем для исходных материалов являлись частицы сферической геометрической формы, полученные распылением серийных заготовок из сплава ВЖ159. Подробная информация по получению порошковых металлокомпозиций приведена в работе [14]. Установка Concept Laser обеспечивала одинаковые параметры синтеза при сплавлении порошков из сплава ВЖ159. Микроструктура (рис. 1) синтезированного материала представляет собой ячеистую структуру, в которой границы ячеек декорированы ультрадисперсными карбидами типа MC. Образцы синтезированного материала прошли стадию термообработки и ГИП (горячего изостатического прессования), которая привела к формированию рекристаллизационного зерна и выделению частиц упрочняющей вторичной фазы.

Механические свойства (предел выносливости на базе 10^5 циклов) определяли при повышенных температурах (400; 500 и 600°C) на динамической многоцелевой сервогидравлической испытательной машине LFV-100 в условиях симметричного цикла нагружения при контроле полной деформации (упругой и пластической) за цикл нагружения, частоте 1 Гц и синусоидальной форме цикла. Испытывали образцы с круглым сечением рабочей части диаметром 5,0 мм и длиной 15 мм (рис. 2).



Рис. 2. Образец для испытаний на малоцикловую усталость

Проводили запись петель механического гистерезиса с использованием высокотемпературного аксиального экстензометра Epsilon серии 3548 с базой 12,5 мм. При динамических испытаниях деформацию измеряют как в направлении растяжения, так и сжатия. Принцип действия экстензометров основывается на регистрации деформирования упругого элемента при перемещении ножек датчика с использованием тензорезисторов.

Перед испытаниями производили настройку обратной связи (настройка PID-параметров) машины с целью установления полного контроля над параметрами цикла. Это необходимо для того, чтобы согласовать выходной сигнал контроллера с выходным сигналом управляющего датчика. При рассогласовании формируется сигнал ошибки, который должен быть усилен пропорциональным коэффициентом. Для этого в захваты устанавливают образец и проводят пробные циклические нагружения, в течение которых подбирают коэффициент пропорциональности для обеспечения соответствия заданной и реализуемой на испытательной машине амплитуды осевой деформации.

Диапазон приложенных нагрузок при МЦУ находится в упругопластической области. Методика обработки экспериментальных данных соответствует ASTM E739-10 и ГОСТ 25-502-79. Более подробное описание особенностей проведения испытаний на МЦУ представлено в работах [15, 16].

Результаты и обсуждение

Развитие микропластических деформаций приводит к нелинейной (неупругой) зависимости между напряжениями и деформациями в процессе циклического нагружения, что сопровождается возникновением замкнутой петли гистерезиса (рис. 3). На двухмерном графике площадь, ограниченная кривыми нагрузки и разгрузки, равна энергии, расходуемой на необратимые процессы, в первую очередь – на неупругое деформирование в локальных объемах материала, в которых напряжения превышают предел текучести. При статистической обработке экспериментальных данных механических испытаний образцов на усталость принята справедливой гипотеза о логнормальном законе их распределения. Проверка гипотезы о принадлежности выборки логнормальному закону распределения с использованием одного из критериев (Пирсона–Колмогорова, Колмогорова–Смирнова, Шапиро–Уилка и др.) [17, 18] не проводилась в связи с отсутствием сомнительных результатов при анализе выборки.

Для определения предела выносливости, соответствующего вероятности разрушения 50%, при каждой температуре испытано не менее 10 образцов. При температурах 400 и 500°C начиная с 5% от общего числа циклов до разрушения вплоть до 95% наблюдается очень небольшое циклическое

упрочнение, характеризующее изменение амплитуды напряжений в среднем на 40 и 20 МПа соответственно (рис. 4, а, б). При температуре 600°C на указанном ранее участке долговечности (рис. 4, в) амплитуда напряжений практически не меняется. Полученные данные показывают, что сплав ВЖ159 при эксплуатационных температурах в области МЦУ практически термически стабилен. Проверка данных амплитуды напряжений обусловлена возможной неоднородностью ее изменения в ходе испытания. На стабильных участках реализуется плавное изменение напряжений растяжения и сжатия.

Для исследования усталостных свойств использовали функциональные соотношения Баскина–Коффина–Мэнсона (1) и Рэмберга–Осгуда (2), в которых полная деформация представлена упругой и пластической составляющими:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma/2 &= \sigma'_f N_f^b; \\ \Delta\varepsilon_p/2 &= \varepsilon'_f N_f^c; \\ \Delta\varepsilon/2 &= \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \varepsilon'_f N_f^c, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\Delta\varepsilon/2$ – амплитуда полной деформации; σ'_f – коэффициент усталостной прочности; b – экспонента усталостной прочности; ε'_f – коэффициент усталостной пластичности; c – показатель усталостной пластичности; N_f – число циклов до разрушения;

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{1/n'}, \tag{2}$$

где $\Delta\varepsilon/2$ – амплитуда полной деформации; $\Delta\sigma/2$ – амплитуда напряжений; E – модуль упругости; K' – коэффициент циклической прочности; n' – коэффициент циклического упрочнения.

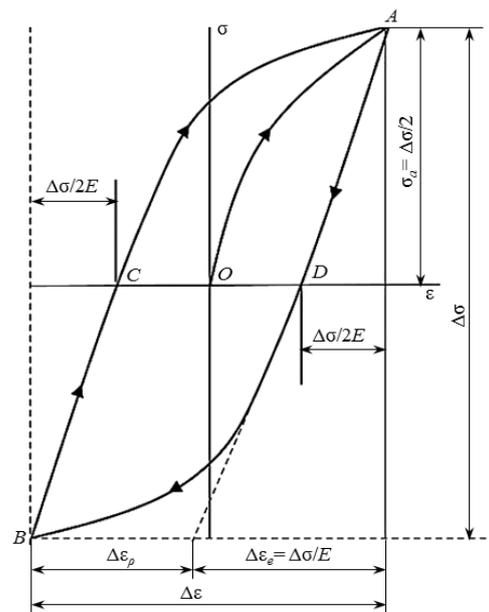


Рис. 3. Параметры упругопластического гистерезиса при циклическом деформировании

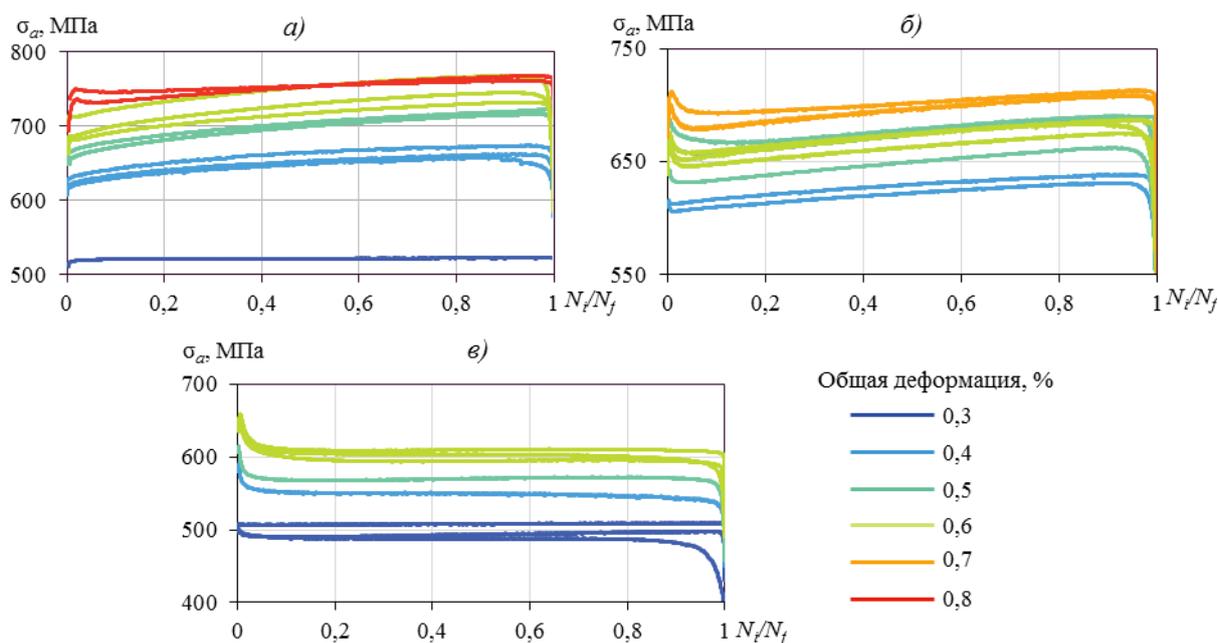


Рис. 4. Изменение амплитуды напряжений сплава ВЖ159 в процессе испытания при температурах 400 (а), 500 (б) и 600°С (в)

Значение амплитуды напряжений и пластической деформации принималось как среднее арифметическое на стабильном участке долговечности. После логарифмирования происходит линейризация пластической составляющей в двойных логарифмических координатах:

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \rightarrow \frac{\Delta \sigma}{2} = K' \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{2} \right)^{n'} \rightarrow \lg \frac{\Delta \sigma}{2} = \lg K' + n' \lg \frac{\Delta \epsilon_p}{2} \quad (3)$$

Для определения коэффициента и экспоненты циклического упрочнения из соотношения Рэмберга–Осгуда применен способ линейного регрессионного анализа (табл. 1).

Визуализация полученных данных представлена на рис. 5.

Аналогичным образом определяли значения уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. В качестве зависимой (контролируемой) переменной принята амплитуда пластической деформации, в качестве независимой – количество циклов до разрушения.

Линейризация пластической составляющей:

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f N_f^c \rightarrow N = \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{2\epsilon'_f} \right)^{1/c} ; \quad (4)$$

$$\lg N = \frac{1}{c} \lg \frac{\Delta \epsilon_p}{2} - \frac{1}{c} \lg \epsilon'_f.$$

Линейризация упругой составляющей:

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = \sigma'_f N_f^b \rightarrow N = \left(\frac{\Delta \sigma}{2\sigma'_f} \right)^{1/b} ; \quad (5)$$

$$\lg N = \frac{1}{b} \lg \frac{\Delta \sigma}{2} - \frac{1}{b} \lg \sigma'_f.$$

Результаты статистической обработки приведены в табл. 2.

Визуализация полученных данных представлена на рис. 6.

Число циклов N_t , соответствующее равенству упругих и неупругих деформаций, имеет название – переходное число циклов, которое для различных металлов и сплавов колеблется в пределах 100–5000 циклов [19, 20]. По расположению данной точки пересечения на оси долговечности можно оценивать материал по двум неразрывным

Таблица 1

Результаты расчета параметров уравнения Рэмберга–Осгуда

Температура испытания, °С	K' , МПа	n'	$R^2(\sigma_a-N)$
400	1084	0,063	0,99
500	947	0,054	0,95
600	881	0,063	0,98

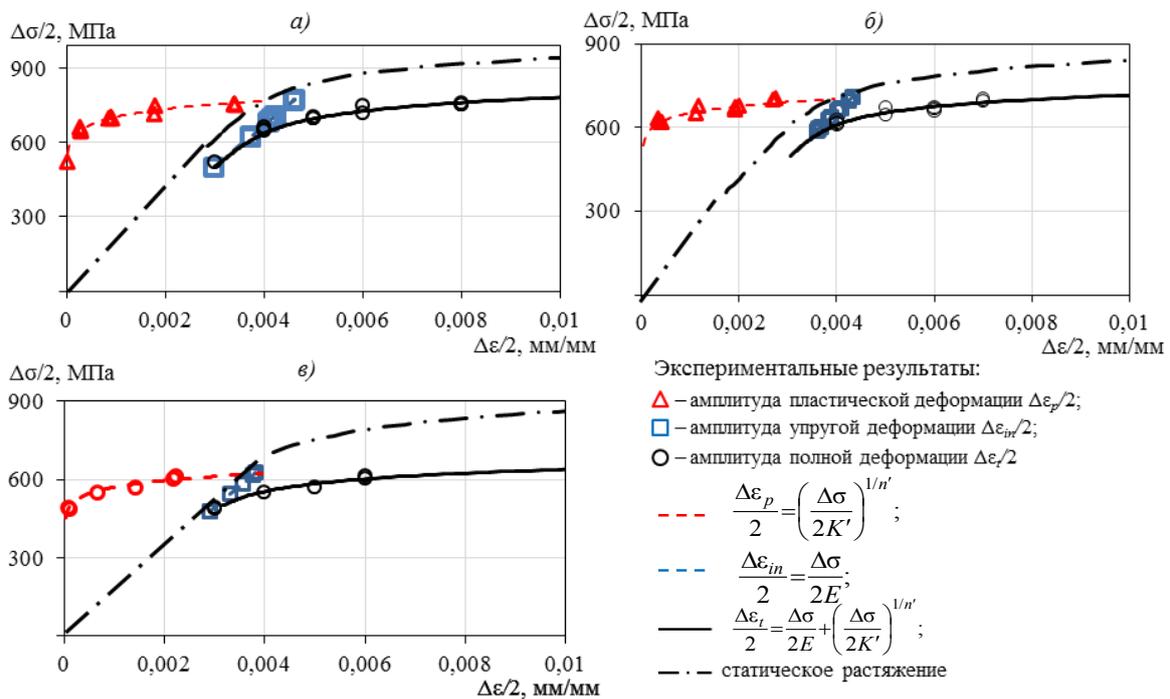


Рис. 5. Соотношение «напряжение–деформация» сплава ВЖ159 по уравнению Рэмберга–Осгуда при температурах 400 (а), 500 (б) и 600°C (в)

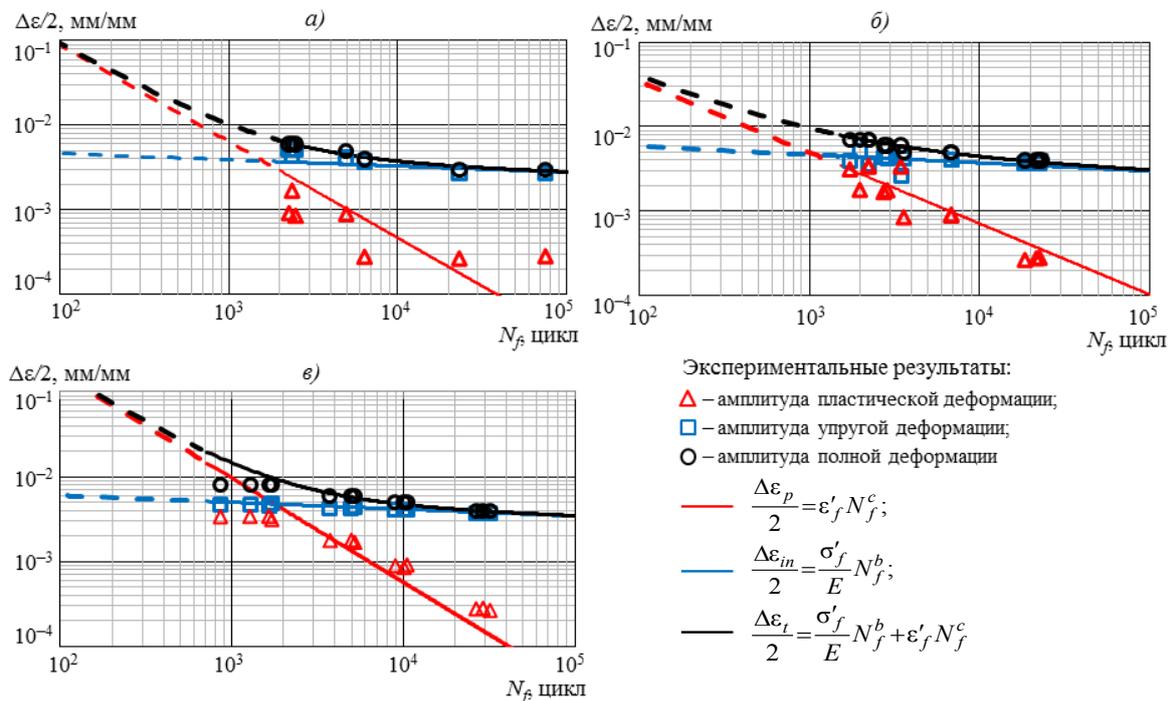


Рис. 6. Деформационные кривые сплава ВЖ159 при температурах 400 (а), 500 (б) и 600°C (в)

Таблица 2

Результаты расчета параметров уравнения Баскина–Мэнсона–Кохфина

Температура испытания, °С	σ_f , МПа	b	$R^2(\sigma_a-N)$	ε_f	c	$R^2(\varepsilon_{a,пл}^* - N)$
400	1423	-0,0807	0,89	46,8	-1,229	0,92
500	1023	-0,0508	0,95	1,88	-0,855	0,99
600	1071	-0,074	0,94	16,75	-1,139	0,97

* $\varepsilon_{a,пл}$ – амплитуда пластической деформации.

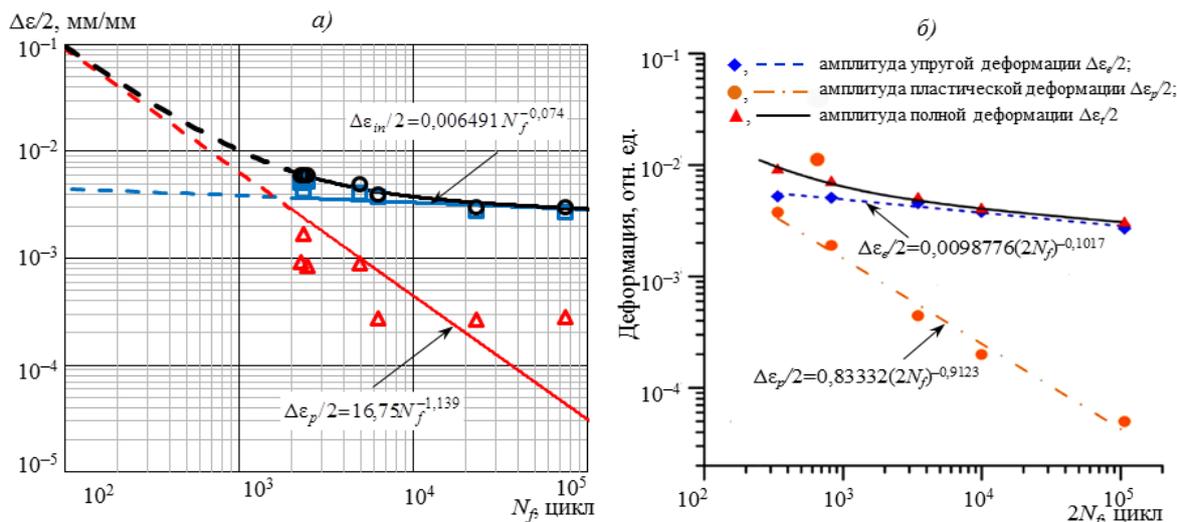


Рис. 7. Результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов из сплава ВЖ159 (а) при 600°С в сравнении с зарубежным аналогом сплавом Inconel 718 (б) при 650°С [12]

свойствам – «прочность–пластичность». При стремлении значений $N_f \rightarrow 1$ материал обладает высокой прочностью, но малой пластичностью, при $N_f \rightarrow \infty$ материал обладает высокой пластичностью, но малой прочностью [21].

Изображенные деформационные кривые (рис. 6) образцов из сплава ВЖ159 имеют точки пересечения при значениях N_f : 1778, 1265 и 1598 циклов по оси абсцисс при температурах 400, 500 и 600°С соответственно, в которых происходит изменение характера деформации, влияющее на усталостную долговечность. Видно, что в области малых значений долговечности неупругие деформации больше, чем упругие; при количестве циклов >10000 преобладают упругие деформации.

Для рассматриваемого сплава ВЖ159 проведено сравнение деформационных кривых МЦУ образцов из сплава Inconel 718. Сравнение результатов малоцикловой усталости с результатами из литературу-

ного источника [12] позволило увидеть (рис. 7) практически близкое совпадение значений полной деформации, при этом у сплава Inconel 718 температура испытания на 50°С больше.

При отсутствии доступных экспериментальных данных по испытаниям на усталость, оценка материала при помощи результатов на растяжение бывает наиболее полезной на этапе проектирования или выбора режимов для проведения исследований на усталостную долговечность. Сравнение приближенных методов с экспериментальными данными при усталостном нагружении вызывает практический интерес в связи с их применимостью для рассматриваемого сплава ВЖ159. В работе [22] для начального изучения процесса усталости определенного материала рекомендуют оценивать все шесть параметров по уже известным результатам на кратковременную прочность. В табл. 3 представлены два наиболее эффективных метода оценки

Таблица 3

Аппроксимационные методы построения деформационных кривых усталости по результатам статического растяжения

Название (автор)	Оценочные значения параметров σ'_f , ϵ'_f , b , c	Литературный источник
Метод четырехточечной корреляции (Мэнсон)	$\sigma'_f = 1,25 \sigma_f \cdot 2^b; \quad \sigma_f = \sigma_B (1 + \epsilon_f);$ $\epsilon'_f = \frac{0,125}{20^c} \left[\ln \left(\frac{1}{1 - \psi} \right) \right]^{0,75};$ $b = \frac{\lg(0,36 \sigma_B / \sigma_f)}{5,6};$ $c = 0,33 \cdot \lg \frac{0,0066 - \sigma'_f (2 \cdot 10^4)^b / E}{0,239 \{ \ln [1 / (1 - \psi)] \}^{0,75}}$	[23]
Модифицированный метод универсальных наклонов (Муралидхаран–Мэнсон)	$\sigma'_f = 0,623 \cdot E \left(\frac{\sigma_B}{E} \right)^{0,832};$ $\epsilon'_f = 0,0196 \cdot \epsilon_f^{0,155} \left(\frac{\sigma_B}{E} \right)^{-0,53};$ $b = -0,09; \quad c = -0,56$	[24]
Примечание. σ_B – предел прочности при растяжении, МПа; σ'_f – истинное напряжение при разрушении, МПа; ϵ'_f – истинная деформация при разрушении; ψ – относительное сужение при разрушении; E – модуль упругости, МПа.		

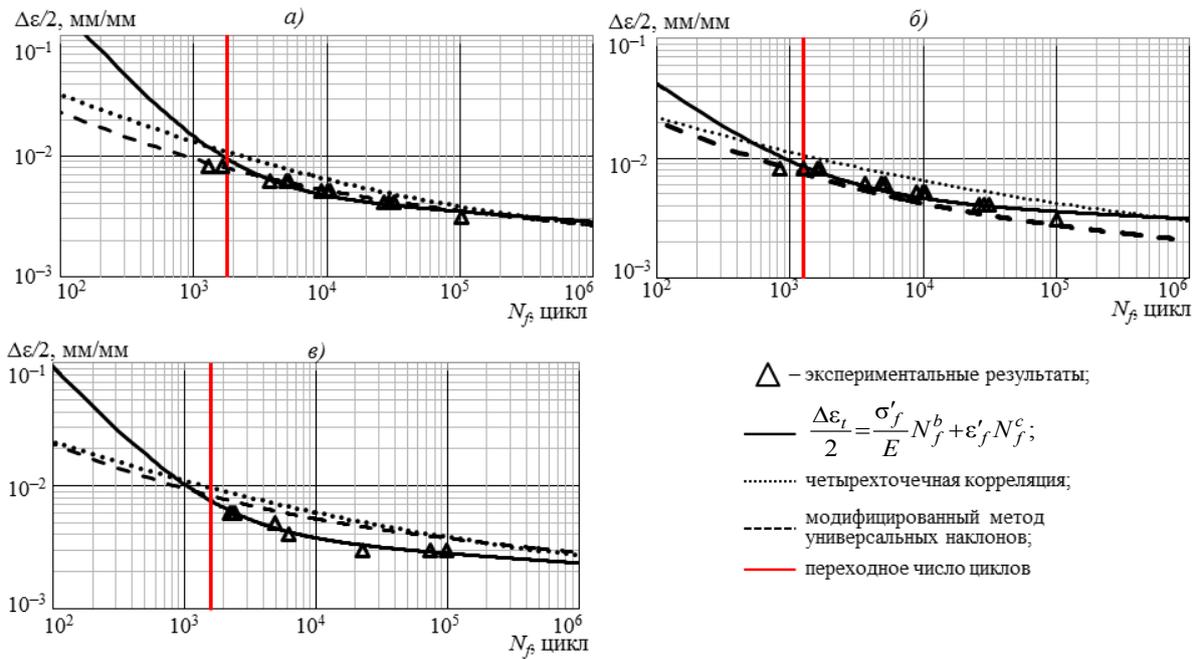


Рис. 8. Сравнение аппроксимационных и экспериментальных деформационных кривых при температурах 400 (а), 500 (б) и 600°С (в)

параметров уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина для жаропрочных сплавов.

По приведенным ранее соотношениям с использованием результатов на растяжение при соответствующих температурах построены деформационные кривые и произведено сравнение с экспериментальными данными. Сравнение кривых (рис. 8) показывает подобие двух аппроксимационных методов, но при сравнении этих методов с экспериментом обнаруживается большое отклонение на участке МЦУ до точки пересечения, в которой упругие и пластические деформации равны (переходное количество циклов). С учетом этого перечисленные методы могут быть использованы лишь для приближенной оценки числа циклов до разрушения.

Уравнения (1) и (2) имеют схожие структуры в том, что амплитуда полной деформации состоит из суммы частей упругой и пластической деформаций. Приравнявая соответствующие компоненты, после преобразований получим соотношения совместимости [25] для n' (показатель циклического упрочнения) и K' (коэффициент циклической прочности):

ского упрочнения) и K' (коэффициент циклической прочности):

$$n' = \frac{b}{c}; \quad K' = \frac{\sigma'_f}{(\epsilon'_f)^{b/c}}. \quad (6)$$

Для рассматриваемого сплава также проведено сравнение (табл. 4) коэффициента циклической прочности (K') и коэффициента циклического упрочнения (n') с параметрами уравнений Басквина–Мэнсона–Коффина и Рэмберга–Осгуда, приведенными ранее в уравнениях (1) и (2).

Полученные соотношения совместимости позволяют использовать результаты МЦУ для получения кривых «напряжение–деформация». Сравнение значений показателей K' и n' при трех повышенных температурах по экспериментальным данным с данными, полученными по уравнениям совместимости, показывает небольшое различие (1–8%). С учетом этого указанный метод может быть успешно использован для рассматриваемого сплава при указанных температурах и уровнях деформации.

Таблица 4

Сравнение значений K' и n' по соотношениям совместимости уравнений Рэмберга–Осгуда (РО) и Басквина–Мэнсона–Коффина (ВМС)

Температура испытания, °С	K' , МПа			n'		
	РО	ВМС	Различие, %	РО	ВМС	Различие, %
400	1084	1105	2	0,063	0,066	8
500	947	985	4	0,054	0,059	8
600	881	892	1	0,063	0,065	3

Заключения

В результате проведенных исследований на усталость образцов из жаропрочного сплава ВЖ159, полученного методом СЛС, установлены следующие особенности.

На основании деформационного подхода установлена долговечность, при которой происходит изменение характера деформации. Для рассмотренных температур испытаний (400, 500 и 600°C) эта долговечность находится в области значений 1778, 1265 и 1568 циклов соответственно.

Сопоставление экспериментальных данных усталостной долговечности с результатами, полученными по оценочным методам (четырёхточечной корреляции, универсальных наклонов Муралидхаран–Мэнсона), показало различие значений пределов выносливости для температур испытаний 400, 500 и 600°C в сред-

нем на 6, 23 и 43% соответственно на базах 10^4 и 10^5 циклов.

Оценочные методы (четырёхточечной корреляции, универсальных наклонов Муралидхаран–Мэнсона) показывают завышенные значения пределов выносливости. Данные методы возможно использовать для подбора режимов испытаний при малоцикловом нагружении на начальном этапе проведения экспериментов для экономии образцов.

Значения коэффициента и показателя циклической прочности, полученные по уравнениям Рэмберга–Осгуда и Басквина–Мэнсона–Коффина, практически совпадают – различие 1–8%. Эти результаты позволяют взаимозаменяемо использовать полученные параметры уравнений, характеризующие свойства материала, в моделях нелинейных упругих материалов с целью решения задач прочностного анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
4. Каблов Е.Н. Что такое инновации // *Наука и жизнь*. 2011. №11. С. 16–21.
5. Геров М.В., Владиславская Е.Ю., Терентьев В.Ф., Просвирнин Д.В., Колмаков А.Г., Антонова О.С. Исследование усталостной прочности сплава Ti–6Al–4V, полученного методом селективного лазерного плавления // *Деформация и разрушение материалов*. 2016. №5. С. 14–20.
6. Беляев М.С., Терентьев В.Ф., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М., Антонова О.С. Малоцикловая усталость жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 в условиях жесткого нагружения // *Деформация и разрушение материалов*. 2015. №9. С. 17–24.
7. Голубовский Е.Р., Волков М.Е., Эммаусский Н.М., Шibaев С.А. Экспериментальное исследование МЦУ монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ВЖМ5 при высоких температурах // *Вестник УФГАТУ*. 2015. Т. 19. №3 (69). С. 119–125.
8. Горбовец М.А., Беляев М.С., Рыжков П.В. Сопrotивление усталости жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом СЛС // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №3 (52). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-50-55.
9. Schayesa C., Vogta J.-B., Bouquerel J., Palleschi F. Rotor Design Optimization through Low Cycle Fatigue Testing // *Procedia Engineering*. 2015. No. 133. P. 33–243.
10. Kima S.-J., Pil H.C., Dewa R.T., Kim W.-G., Kim M.-H. Low cycle fatigue properties of Alloy 617 base metal and weld joint at room temperature // *Procedia Materials Science*. 2014. No. 3. P. 2201–2206.
11. Gopinath K., Gogia A.K., Kamat S.V., Balamuralikrishnan R., Ramamurty U. Low cycle fatigue behaviour of a low interstitial Ni-base superalloy // *Acta Materialia*. 2009. No. 57. P. 3450–3459.
12. Chen G., Zhang Y., Xu D.K. et al. Low cycle fatigue and creep-fatigue interaction behavior nickel-base superalloy GH4169 at elevated temperature of 650°C // *Materials Science & Engineering: A*. 2016. Vol. 655. P. 175–182.
13. Praveen K.V.U., Singh V. Effect of heat treatment on Coffin–Manson relationship in LCF of superalloy IN718 // *Materials Science & Engineering: A*. 2016. Vol. 485. P. 352–358.
14. Алексеев А.В., Растегаева Г.Ю., Пахомкина Т.Н. Определение кислорода и азота в порошках никелевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2018. №8 (68). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-112-119.
15. 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: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №12. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-4-4.

16. Волков А.М., Востриков А.В. Сопротивление гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов разрушению при малоцикловой усталости (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №S1 (43). С. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-74-79.
17. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.
18. Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов: РЦ-АП-33.15-1. М.: Авиаиздат, 2013. С. 32–33.
19. Srivatsan T.S. Mechanisms of damage in high-temperature, low cycle fatigue of on aluminum alloy // *International Journal of Fatigue*. 1988. No. 2 (10). P. 91–99.
20. 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.
21. Lee Y.-L., Barkey M.E., Kang H.-T. *Metal fatigue analysis handbook: practical problem-solving techniques for computer-aided engineering*. Elsevier, 2012. P. 222–223.
22. Meggiolaro M.A. Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions // *International Journal of Fatigue*. 2004. No. 26. P. 452–467.
23. Manson S.S. Fatigue: a Complex Subject – Some Simple Approximations // *Experimental Mechanics*. 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*. 1988. No. 110. P. 55–58.
25. Bannantine J.A., Comer J.J., Handrock J.L. *Fundamentals of metal fatigue analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1990. P. 63.