
Научная статья

УДК 620.178.35:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-111-122

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

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

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проведены испытания на малоцикловую усталость жаропрочного никелевого сплава при температуре эксплуатации, отнулевом цикле деформации и частоте 1 Гц. На примере полученных данных упругопластического деформирования определены материальные константы уравнений Мэнсона–Коффина и Рэмберга–Осгуда. Рассмотрены основные соотношения, учитывающие энергию разрушения. Показано, что применение энергетического критерия накопленной плотности энергии деформации позволяет точнее описывать усталостное поведение в режиме малоциклового усталости. Полученные данные подтверждают возможность использования энергетического критерия для прогнозирования долговечности исследованного сплава в условиях концентрации напряжений.

Ключевые слова: механические свойства, характеристики усталости, жаропрочные деформируемые никелевые сплавы, плотность энергии деформации, уравнения Мэнсона–Коффина и Рэмберга–Осгуда

Для цитирования: Рыжков П.В., Горбовец М.А., Ходинев И.А. Энергетический критерий усталостного разрушения жаропрочного никелевого сплава // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-111-122.

Scientific article

ENERGY CRITERIA FOR FATIGUE FRACTURE OF A HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY

P.V. Ryzhkov¹, M.A. Gorbovets¹, I.A. Hodinev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Tests for low-cycle fatigue of a heat-resistant nickel alloy were carried out at operating temperature, deformation of tensile cycle and a frequency of 1 Hz. On the example of the obtained data of elastic-plastic deformation, the material constants of the Manson–Coffin and Ramberg–Osgood equations are determined. The main relationships that use the energy of destruction, necessary for predicting fatigue life, are considered. It is shown that the application of the energy criterion in terms of the accumulated strain energy density parameter more accurately describes the fatigue behavior in the low-cycle fatigue regime. The data obtained will make it possible in the second part of the article to use the energy criterion to predict the durability of the alloy under study under conditions of stress concentration.

Keywords: mechanical properties, fatigue characteristics, high-temperature wrought nickel alloys, strain energy density, Manson–Coffin and Ramberg–Osgood equations

For citation: Ryzhkov P.V., Gorbovets M.A., Hodinev I.A. Energy criteria for fatigue fracture of a heat-resistant nickel alloy. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-111-122.

Введение

Металлические материалы авиационных двигателей часто подвергаются периодическим нагрузкам при длительной эксплуатации [1]. Внедрение методов определения усталостных характеристик в широком диапазоне нагрузок и долговечности имеет решающее значение для оптимизации конструктивных узлов изделий для предотвращения возможных отказов и аварий летательных аппаратов [2]. Испытания на усталость продолжительны и требуют многочисленных ресурсов испытательного оборудования. Исторически сложилось, что усталостные характеристики определяют на нескольких уровнях нагружения образцов, вырезанных из характерных мест изделий. По результатам испытаний формируют выборку данных для аппроксимации кривой усталости, которая позволяет определить предел выносливости с установленным значением вероятности разрушения [3, 4].

В настоящее время разрабатываются методы прогнозирования усталостной долговечности, основанные на энергетическом критерии усталостного разрушения [5–7]. Энергетический критерий универсален, его можно использовать для сравнения плотностей энергии деформации при динамическом и статическом нагружении. Структурно-энергетическое описание процессов упругопластической деформации и разрушения твердых тел позволило выявить глубокую взаимосвязь пластической деформации металла, накопления повреждений с энергетическими характеристиками процесса.

Структурно-энергетический анализ упругопластической деформации и накопления повреждений в металлах показал, что с термодинамической точки зрения все элементарные акты процессов можно условно разделить на две группы, отличающиеся кинетическими закономерностями [8]. Первая группа связана с зарождением и развитием различного рода дефектов, что обуславливает накопление в деформируемых объемах скрытой энергии и влияет на процессы деформационного упрочнения и объемной повреждаемости материала. Вторая группа участвует в процессах пластической деформации материала и динамическом возврате, а также обуславливает трансформацию необратимой энергии в тепловую, что проявляется в виде теплового эффекта. Исследования второй группы обычно проводят с использованием специального высокотехнологичного оборудования [9].

Результаты исследований данной работы отнесены к первой группе. Большинство энергетических моделей усталостного повреждения основаны на определении плотности энергии деформации цикла в середине испытания. По этой причине анализ переходных процессов упрочнения и разупрочнения в режиме малоциклового нагружения даже при постоянной амплитуде деформации затруднен [10]. Для оценки усталостной долговечности элементов конструкций перспективным является подход, основанный на оценке усталостного повреждения через общую поглощенную энергию разрушения [11]. Данной проблеме посвящены немногочисленные исследования, проведенные при одноосном нагружении.

Соответствие энергетическому критерию усталостного разрушения экспериментальных результатов, полученных при исследовании различных сталей и сплавов при осевом нагружении, кручении и других видах пропорционального и непропорционального нагружения в мало- и многоцикловом режиме, проанализировано в работе [12]. Установлено, что при различных режимах нагружения экспериментальные данные располагаются вблизи прямых, которые соответствуют результатам, полученным при одноосном нагружении. Энергетические критерии усталостного разрушения использованы для прогнозирования количества циклов до разрушения с учетом вида и режима нагружения, а также других факторов [13–15]. Оценка и сравнение плотности энергии деформации стабилизированной петли гистерезиса и полной поглощенной энергии

разрушения с позиции материальных констант уравнений Рэмберга–Осгуда, Мэнсона–Коффина и результатов численного интегрирования позволят использовать энергетический критерий для прогнозирования долговечности исследуемого сплава в условиях концентрации напряжений.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16].

Материалы и методы

Модельный сплав, выбранный для оценки энергии разрушения при малоцикловом нагружении, по химическому составу идентичен зарубежному аналогу Inconel 718. Содержание основных элементов в никелевом жаропрочном сплаве, % (по массе):

Ni	Cr	Al	Mo	Nb	Ti	Fe	C
Основа	19	0,5	3	5,1	0,9	18,5	0,03

Сплав относится к железоникелевым, содержит большое количество хрома и сочетает гетерофазное упрочнение γ/γ' - и γ/γ'' -фаз ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ и Ni_3Nb соответственно). Микроструктура сплава (рис. 1) представлена равномерно распределенными равноосными зёрнами γ -твердого раствора, нитридами, карбидами M_{23}C_6 на основе Cr, Mo и частицами δ -фазы на основе никеля и ниобия [17]. Подробнее о формировании фазового состава никелевых сплавов и морфологии упрочняющей фазы изложено в работах [18, 19]. Образцы вырезали из слитков, выплавленных методом тройного переплава: вакуумная индукционная выплавка + электрошлаковый переплав + вакуумно-дуговой переплав. Термическую обработку проводили в две стадии: закалка при температуре 1200 °С и старение при температуре ~700 °С, при котором происходит интенсивная коагуляция мелкодисперсных упрочняющих частиц γ'' -фазы.

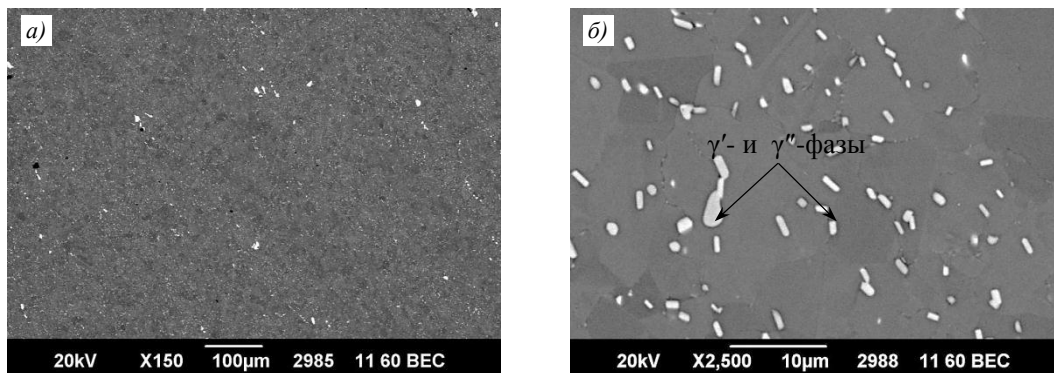


Рис. 1. Микроструктура (а) и распределение карбидов, нитридов и частиц фазы на основе никеля и ниобия (б)

Значения усталостной долговечности получены на динамической сервогидравлической испытательной машине при повышенной температуре (650 °С), частоте 1 Гц и контроле амплитуды полной деформации (упругой и пластической) синусоидального отнулевого цикла ($R_\epsilon = 0$). Испытаны гладкие цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 5 мм, размеры и поверхность которых соответствовали требованиям

ГОСТ 25.502–79 и ASTM E606. Особенности экспериментального определения малоциклового усталости изложены в работе [20]. Выборка состояла из 9 образцов. Для построения медианной кривой на исследуемых амплитудах контролируемой осевой деформации проверена гипотеза об однородности дисперсии случайной величины (усталостной долговечности), распределенной по логнормальному закону. Среднее значение вероятности допустимой ошибки (*p-value*) составило 0,1 ($\alpha = 10\%$). Коэффициенты кривой усталости определены после проверки однородности методом нелинейной оптимизации.

Петли механического гистерезиса записаны с использованием высокотемпературного аксиального экстензометра с базой 12,5 мм. Принцип действия экстензометров основывается на регистрации деформации упругого элемента при перемещении ножек датчика с использованием тензорезисторов. Значения упругопластического гистерезиса получены с помощью контроллера испытательной машины, представляющего собой устройство сбора, обработки, сохранения и вывода данных в формате с кодировкой ASCII для их дальнейшего конвертирования и анализа. Исходные значения амплитуд напряжений и пластической деформации для определения коэффициентов уравнений Рэмберга–Осгуда и Мэнсона–Коффина получены в середине испытания ($N_p/2$).

Численное интегрирование проводили в автоматической среде вычислений Matlab 2019 с использованием метода трапеций, согласно которому петли гистерезиса разбивали на подобласти равномерно распределенных трапеций с последующим вычислением по формуле

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2N} \sum_{n=1}^N (f(x_n) + f(x_{n+1})) = \frac{b-a}{2N} [f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + f(x_{N+1})], \quad (1)$$

где интервал между каждой точкой равен скалярному значению $(b-a)/N$.

Результаты и обсуждение

Кривые усталости

На рис. 2 представлены исходные значения усталостной долговечности гладких образцов из никелевого жаропрочного сплава при температуре 650 °С и «жестком» цикле нагружения.

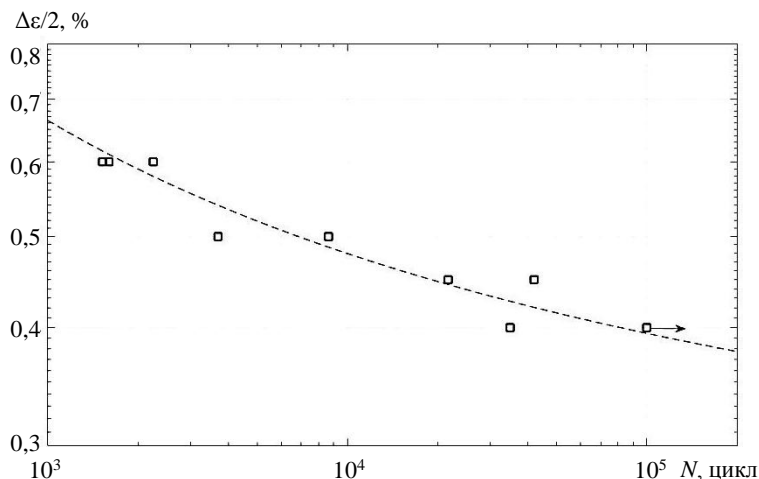


Рис. 2. Кривая усталости жаропрочного никелевого сплава

Кривая циклической деформации и деформационные кривые

В общем случае кривую циклической деформации (рис. 3) можно представить уравнением Рэмберга–Осгуда, позволяющим оценить нелинейную связь между напряжениями и деформациями в области малых деформаций, характерную для большинства высокопрочных металлических материалов:

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

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

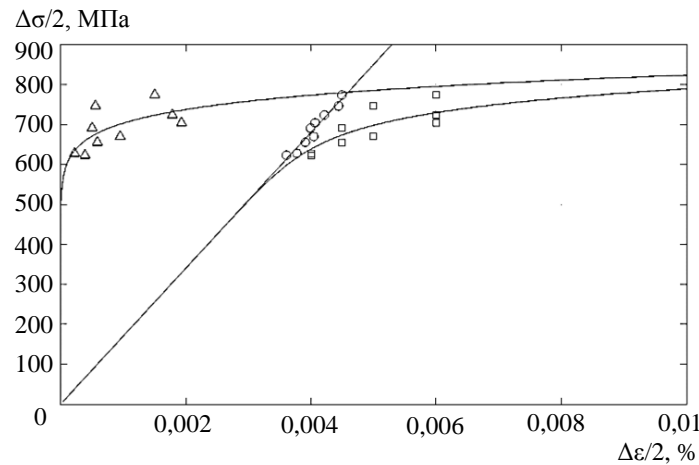


Рис. 3. Кривые циклической деформации: пластической (Δ), упругой (\circ) и полной (\square)

Данные циклической деформации во временной области (рис. 4) обычно описывают уравнением Мэнсона–Коффина:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f}{E} N^b + \varepsilon_f N^c, \quad (3)$$

где N – количество циклов до разрушения; σ_f , ε_f – коэффициенты сопротивления усталости и пластичности; b , c – показатели сопротивления усталости и пластичности.

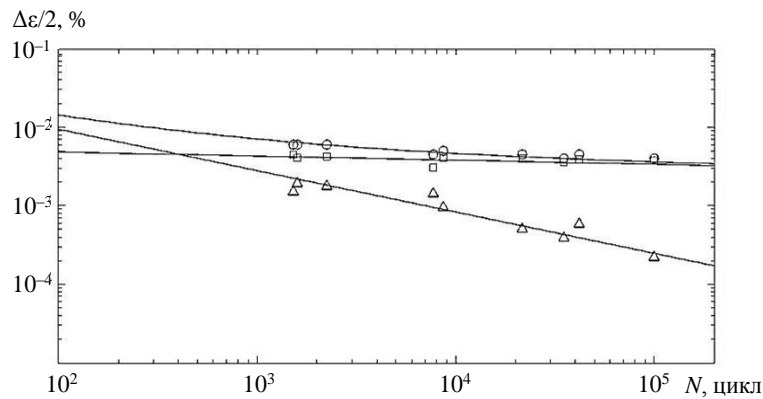


Рис. 4. Кривые упругой (\square), пластической (Δ) и полной (\circ) деформаций

Уравнение Мэнсона–Коффина достаточно точно описывает поведение материала при циклических испытаниях, о чем свидетельствуют незначительные отклонения эмпирических кривых от экспериментальных точек. Полученные деформационные кривые пересекаются в точке «415 циклов» по оси абсцисс, которая разделяет характер деформации и влияет на усталостную долговечность. Точка пересечения кривых упругой и пластической деформаций называется переходной долговечностью (N_t). Левее данной точки преобладает пластическая деформация, правее – упругая.

В результате обработки данных упругопластической деформации методом наименьших квадратов определены коэффициенты уравнений (2) и (3):

K , МПа	n	σ_f , МПа	b	ϵ_f	c
1129	0,068	1108	-0,052	0,106	-0,526

Энергетический критерий усталостного разрушения

Прогнозирование усталостной долговечности с использованием энергетического критерия предполагает, что разрушение произойдет при достижении определенного значения плотности энергии деформации. В случае малоциклового усталости определяющей компонентой усталостного повреждения является пластическая составляющая, которая представляет собой площадь петли гистерезиса (рис. 5).

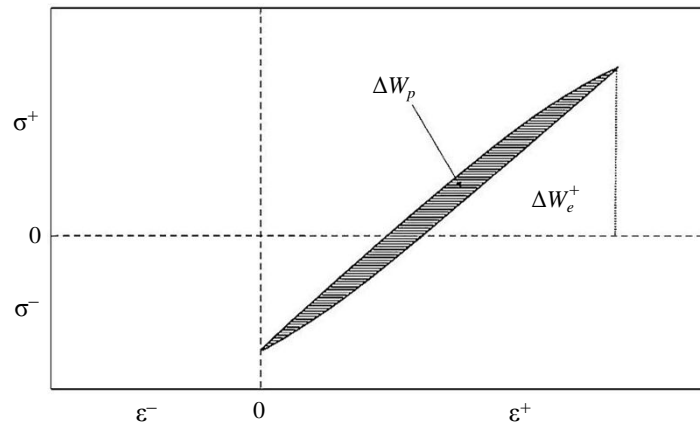


Рис. 5. Плотность энергии деформации при циклической деформации

Энергию, поглощенную при циклическом нагружении (ΔW_p), можно оценить с помощью численного интегрирования петли упругопластического гистерезиса (уравнение 4) либо соотношения, в котором в качестве материальных констант использованы значения из уравнений Рэмберга–Осгуда и Мэнсона–Коффина для случая отнулевого цикла деформации (уравнение 4.1):

$$\Delta W_p = \int_0^{\Delta \epsilon} \sigma \cdot \partial \epsilon - 2 \int_0^{\Delta \sigma} \epsilon \cdot \partial \sigma, \tag{4}$$

$$\Delta W_p = 4 \left(\frac{1-n}{1+n} \right) \epsilon_f \sigma_f N^{b+c}, \tag{4.1}$$

где σ – напряжение; ϵ – деформация; $\Delta \sigma$, $\Delta \epsilon$ – размах напряжений и деформаций соответственно.

Для изучения влияния среднего напряжения в цикле нагружения в области растяжения в работе [21] использовали значение плотности упругой энергии деформации. В случае продолжительных баз испытаний определение пластической составляющей методологически затруднено, поэтому распространено представление данных в виде упругой составляющей плотности энергии деформации:

$$\Delta W_e = \int_0^{\varepsilon} \Delta \sigma \cdot \partial \varepsilon_e = \frac{1}{2E} \left(\frac{\Delta \sigma}{2} \right)^2. \quad (5)$$

Полная плотность энергии деформации представляет собой сумму упругой (ΔW_e) и пластической (ΔW_p) компоненты, которая выражается через степенную форму функциональной зависимости от долговечности:

$$\Delta W_T = \Delta W_e + \Delta W_p, \quad (6)$$

$$\Delta W_T = W_f N^m, \quad (6.1)$$

где W_f , m – коэффициент и показатель усталостной вязкости соответственно.

На рис. 6 представлено сравнение полной плотности энергии деформации цикла в середине испытания в режиме малоциклового усталости. Значение ΔW_T определено по результатам численного интегрирования и расчета с помощью уравнения, использующего материальные константы уравнений Рэмберга–Осгуда и Мэнсона–Коффина. Основное различие результатов, полученных данными методами, проявляется в интервале долговечности от 10^3 до 10^4 циклов. При уменьшении приложенной деформации (10^5 циклов) указанные различия становятся минимальными.

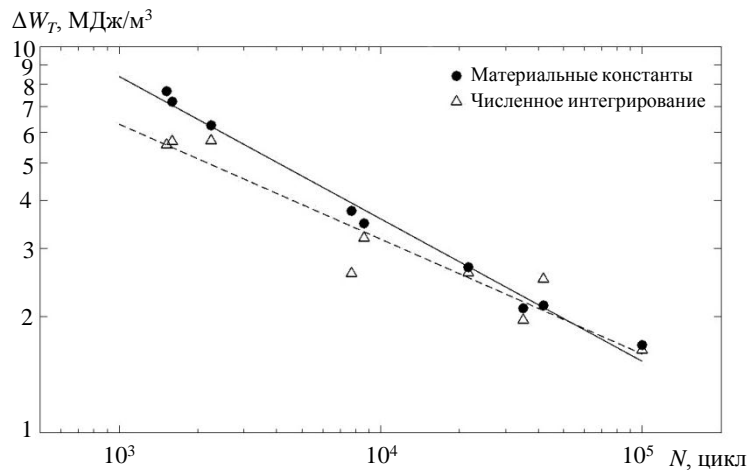


Рис. 6. Зависимость плотности энергии деформации стабилизированной петли гистерезиса в середине испытания от усталостной долговечности

Разделение полной плотности энергии деформации стабилизированной петли гистерезиса в середине испытания представлено на рис. 7. Точка пересечения расположена в области $2 \cdot 10^4$ циклов – заметно правее точки пересечения деформационных кривых (рис. 4).

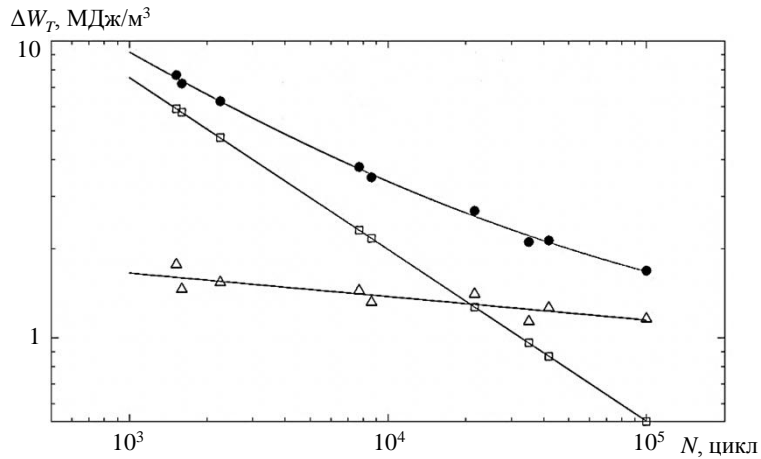


Рис. 7. Упругая (Δ) и пластическая (\square) компоненты полной (\bullet) плотности энергии деформации стабилизированной петли гистерезиса в середине испытания

На рис. 8 показано изменение плотности энергии деформации за цикл (ΔW_T) в зависимости от нормированной долговечности (N_i/N_f) в процессе испытания на малоцикловую усталость. Наиболее существенные изменения проявляются в начале испытания ($\sim 10\%$ от долговечности). После наблюдается постепенное разупрочнение, выражающееся в увеличении плотности энергии деформации, которая стремится к значению, рассчитанному по материальным константам уравнений деформационного подхода.

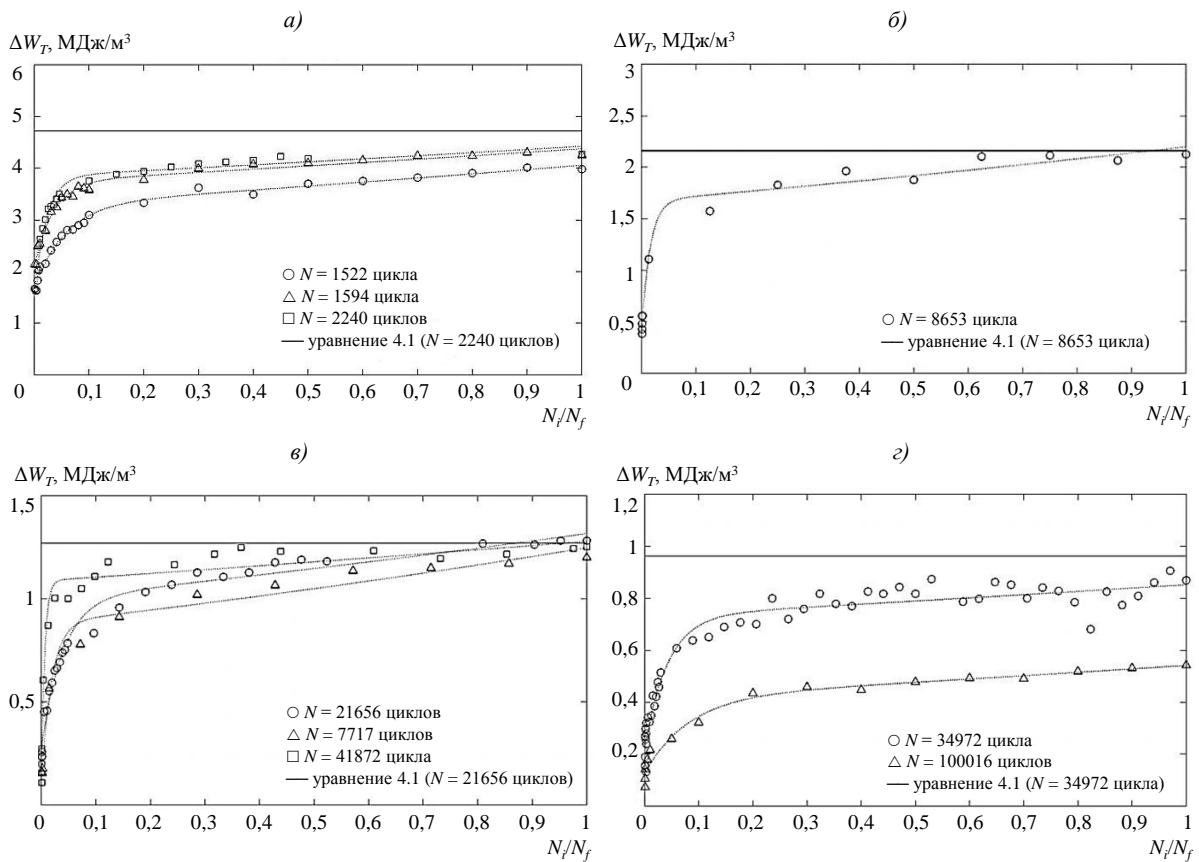


Рис. 8. Зависимости полной плотности энергии деформации за цикл от нормированной долговечности при амплитуде деформации 0,6 (а), 0,5 (б), 0,45 (в) и 0,4 % (г)

Накопленная плотность энергии деформации представляет собой сумму плотностей энергии упругой и пластической деформаций каждого цикла:

$$\Delta W_T = \sum_{i=1}^{N_f} (\Delta W_e + \Delta W_p)_i. \quad (7)$$

На рис. 9 приведено сравнение рассчитанных с использованием материальных констант и экспериментальных данных.

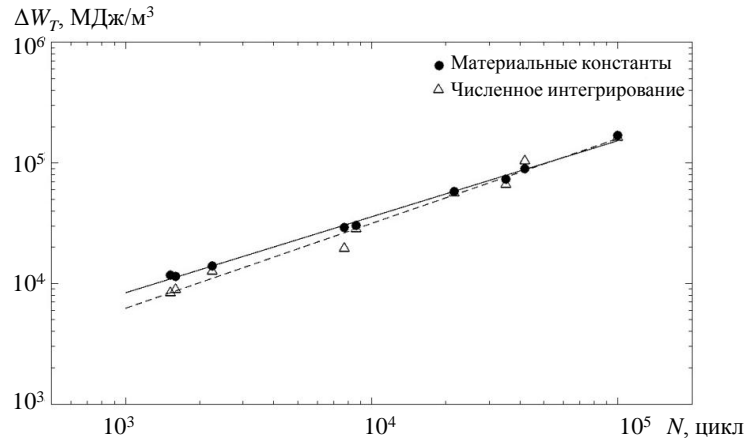


Рис. 9. Зависимости накопленной плотности энергии деформации от усталостной долговечности

Полученные линейные регрессионные модели характеризуются повышенным коэффициентом корреляции ($R^2 = 0,99$) по отношению к моделям, использующим плотность энергии деформации стабилизированной петли гистерезиса ($R^2 = 0,95$). Основное различие (25 %) при сравнении результатов численного интегрирования и расчета по материальным константам проявляется в области малой долговечности ($\sim 10^3$ циклов), при которой значения пластической деформации наиболее высокие. В условиях преобладающей упругой деформации и незначительной пластической деформации на участке долговечности от 10^4 до 10^5 циклов указанные различия становятся минимальными. Суммарная энергия неупругой деформации повышается с увеличением количества циклов до разрушения, т. е. с уменьшением приложенных нагрузок. Это свидетельствует о том, что не вся энергия, рассеиваемая в материале в процессе циклического нагружения, связана с усталостным повреждением. Детальный анализ зависимости долговечности от накопленной плотности энергии деформации приведен в работе [22]. Таким образом, при анализе взаимосвязи плотности энергии деформации и долговечности важно определить область применимости критерия, инвариантного количеству циклов до разрушения.

Заключения

Проведены испытания цилиндрических образцов из никелевого жаропрочного сплава на малоцикловую усталость при температуре эксплуатации 650°C . Определены материальные константы уравнений Мэнсона–Коффина и Рэмберга–Осгуда. Установлено, что оценка плотности энергии деформации по материальным константам в интервале долговечности 10^3 – 10^4 циклов приводит к ошибке 15–25 % соответственно. Применение в качестве энергетического критерия накопленной плотности энергии деформации позволяет точнее описывать усталостное поведение в режиме малоцикловой усталости. Полученные данные подтверждают возможность использования энергетического критерия для прогнозирования долговечности исследованного сплава в условиях концентрации напряжений.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Жаропрочные конструкционные материалы // Литейное производство. 2005. № 7. С. 2–7.
2. Socie D., Marquis G. *Multiaxial Fatigue*. SAE International, 1999. 502 p.
3. 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.
4. 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: 10.03.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
5. Liao D., Zhu S.-P. Energy field intensity approach for notch fatigue analysis // *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 127. P. 190–202. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.010.
6. Rigon D., Berto F., Meneghetti G. Estimating the multiaxial fatigue behaviour of C45 steel specimens by using the energy dissipation // *International Journal of Fatigue*. 2021. Vol. 151. P. 106381. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106381.
7. Benedetti M., Berto F., Le Bone L., Santus C. A novel Strain-Energy-Density based fatigue criterion accounting for mean stress and plasticity effects on the medium-to-high-cycle uniaxial fatigue strength of plain and notched components // *International Journal of Fatigue*. 2020. Vol. 133. P. 105397. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105397.
8. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
9. Halford G.R. The energy required for fatigue (Plastic strain hysteresis energy required for fatigue in ferrous and nonferrous metals) // *Journal of materials*. 1966. Vol. 1. P. 3–18.
10. Hellouin de Menibus A., Auzoux Q., Besson J., Crépin J. Temperature increase of Zircaloy-4 cladding tubes due to plastic heat dissipation during tensile tests at 0.1–10s⁻¹ strain rates // *Journal of Nuclear Materials*. 2014. Vol. 454. Is. 1–3. P. 247–254. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.08.011.
11. Ellyin F. *Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction*. London: Chapman & Hall, 1997. 486 p.
12. Park J., Nelson D. Evaluation of an energy-based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life // *International Journal of Fatigue*. 2000. Vol. 22. Is. 1. P. 23–39. DOI: 10.1016/S0142-1123(99)00111-5.
13. Lian Y., Wang X., Wang J. et al. Application of strain energy based approach for evaluation of fatigue crack growth retardation effect under random overload // *Engineering Fracture Mechanics*. 2022. Vol. 269. P. 108522. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108522.
14. Hao M.-F., Zhu S.-P., Xia F.-L. Multiaxial fatigue life evaluation using strain energy-based critical plane approach // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 22. P. 78–83. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.01.011.
15. Mahtabi M.J., Shamsaei N. A modified energy-based approach for fatigue life prediction of superelastic NiTi in presence of tensile mean strain and stress // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016. Vol. 117. P. 321–333. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.08.012.
16. 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.
17. Moyer J.M., Jackman L.A., Adaszczik C.B. et al. Advances in triple melting superalloys 718, 706, and 720. *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*. TMS, 1994. P. 39–48.
18. Каблов Е.Н., Летников М.Н., Оспенникова О.Г., Бакрадзе М.М., Шестакова А.А. Особенности формирования частиц упрочняющей γ' -фазы в процессе старения высоколегированного жаропрочного деформируемого никелевого сплава ВЖ175-ИД // *Труды ВИАМ*. 2019. № 9 (81). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-3-14.

19. 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: 13.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-3-10.
20. 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: 03.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
21. Shun-Peng Z., Lei Q., Huang H. et al. Mean stress effect correction in strain energy-based fatigue life prediction of metals // *International Journal of Damage Mechanics*. 2017. Vol. 26. P. 1219–1241.
22. Lagoda T. Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading. Part I: The model elaboration // *International Journal of Fatigue*. 2001. Vol. 23. Is. 6. P. 467–480.

References

1. Kablov E.N. Heat-resistant structural materials. *Liteynoe proizvodstvo*, 2005, no. 7, pp. 2–7.
2. Socie D., Marquis G. *Multiaxial Fatigue*. SAE International, 1999, 502 p.
3. 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.
4. 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: March 10, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-1-80-94.
5. Liao D., Zhu S.-P. Energy field intensity approach for notch fatigue analysis. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 127, pp. 190–202. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.010.
6. Rigon D., Berto F., Meneghetti G. Estimating the multiaxial fatigue behaviour of C45 steel specimens by using the energy dissipation. *International Journal of Fatigue*, 2021, vol. 151, p. 106381. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106381.
7. Benedetti M., Berto F., Le Bone L., Santus C. A novel Strain-Energy-Density based fatigue criterion accounting for mean stress and plasticity effects on the medium-to-high-cycle uniaxial fatigue strength of plain and notched components. *International Journal of Fatigue*, 2020, vol. 133, p. 105397. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105397.
8. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Equations of state of viscoelastoplastic media with damage*. Moscow: Fizmatlit, 2008, 424 p.
9. Halford G.R. The energy required for fatigue (Plastic strain hysteresis energy required for fatigue in ferrous and nonferrous metals). *Journal of materials*, 1966, vol. 1, pp. 3–18.
10. Hellouin de Menibus A., Auzoux Q., Besson J., Crépin J. Temperature increase of Zircaloy-4 cladding tubes due to plastic heat dissipation during tensile tests at 0.1–10s⁻¹ strain rates. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, vol. 454, is. 1–3, pp. 247–254. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.08.011.
11. Ellyin F. *Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction*. London: Chapman & Hall, 1997. 486 p.
12. Park J., Nelson D. Evaluation of an energy-based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life. *International Journal of Fatigue*, 2000, vol. 22, is. 1, pp. 23–39. DOI: 10.1016/S0142-1123(99)00111-5.
13. Lian Y., Wang X., Wang J. et al. Application of strain energy based approach for evaluation of fatigue crack growth retardation effect under random overload. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, vol. 269, p. 108522. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108522.
14. Hao M.-F., Zhu S.-P., Xia F.-L. Multiaxial fatigue life evaluation using strain energy-based critical plane approach. *Procedia Structural Integrity*, 2019, vol. 22, pp. 78–83. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.01.011.

15. Mahtabi M.J., Shamsaei N. A modified energy-based approach for fatigue life prediction of super-elastic NiTi in presence of tensile mean strain and stress. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, vol. 117, pp. 321–333. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.08.012.
16. 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.
17. Moyer J.M., Jackman L.A., Adaszczik C.B. et al. *Advances in triple melting superalloys 718, 706, and 720. Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*. TMS, 1994, pp. 39–48.
18. Kablov E.N., Letnikov M.N., Ospennikova O.G., Bakradze M.M., Shestakova A.A. Particulars of the precipitation strengthening γ' -phase during aging of heat-resistant wrought nickel superalloy VZh175-ID. *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-3-14.
19. 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: August 13, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-3-10.
20. 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: August 03, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
21. Shun-Peng Z., Lei Q., Huang H. et al. Mean stress effect correction in strain energy-based fatigue life prediction of metals. *International Journal of Damage Mechanics*, 2017, vol. 26, pp. 1219–1241.
22. Łagoda T. Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading. Part I: The model elaboration. *International Journal of Fatigue*, 2001, vol. 23, is. 6, pp. 467–480.

Информация об авторах

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

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

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

Information about the authors

Peter V. Ryzhkov, Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 28.09.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.10.2023.

The article was submitted 28.09.2023; approved and accepted for publication after reviewing 11.10.2023.