

Научная статья

УДК 620.1:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-123-137

ИСПЫТАНИЯ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ С ВЫДЕРЖКОЙ В ЦИКЛЕ ЖАРОПРОЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

М.А. Горбовец¹, И.А. Ходинев¹, М.М. Карашаев¹, П.В. Рыжков¹

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

Аннотация. Дан обзор методик проведения испытаний на малоцикловую усталость с выдержкой в цикле и представлены результаты испытаний никелевых жаропрочных сплавов и сталей. Представлено описание моделей расчета повреждаемости при взаимодействии по механизмам усталости и ползучести. Проанализированы требования, предъявляемые к методам, оборудованию и результатам испытаний для металлических материалов. Рассмотрены фрактографические особенности разрушения от высокотемпературной усталости при длительных выдержках никелевых жаропрочных сплавов и сталей.

Ключевые слова: механические свойства, характеристики усталости, жаропрочные никелевые сплавы, нерегулярное нагружение, суммирование повреждений, циклическая долговечность

Для цитирования: Горбовец М.А., Ходинев И.А., Карашаев М.М., Рыжков П.В. Испытания на малоцикловую усталость с выдержкой в цикле жаропрочных металлических материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-123-137.

Scientific article

LOW CYCLE DWELL FATIGUE TESTING OF HEAT RESISTANT METALLIC MATERIALS (review)

М.А. Gorbovets¹, I.A. Hodinev¹, M.M. Karashaev¹, P.V. Ryzhkov¹

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

Abstract. A review of the methods for testing dwell low-cycle fatigue is carried out and the results of tests of nickel heat-resistant alloys and steels are presented. The description of models for calculating damage in the interaction of fatigue and creep is presented. The requirements for specimens, equipment and test results for metallic materials are analyzed. The fractographic features of fracture due to high-temperature dwell fatigue of heat-resistant nickel alloys and steels are considered.

Keywords: mechanical properties, fatigue, high-temperature nickel alloys, irregular loading, damage accumulation, cyclic durability

For citation: Gorbovets M.A., Hodinev I.A., Karashaev M.M., Ryzhkov P.V. Low cycle dwell fatigue testing of heat resistant metallic materials (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-123-137.

Введение

В стандартной практике проектирования оценка ресурса валов и дисков компрессора газотурбинных двигателей (ГТД) состоит в определении напряженно-деформированного состояния конструктивного узла и численного расчета косвенного повреждения на основе гипотезы линейного суммирования по критериям малоцикло-вой усталости (МЦУ) и ползучести [1]. В процессе ползучести и МЦУ в определенной степени моделируется эксплуатационное нагружение валов и дисков компрессора в «горячей» части ГТД. Согласно гипотезе линейного суммирования, накопление повреждений по механизмам ползучести и МЦУ рассматривается независимо друг от друга, т. е. без учета их взаимодействия [2]. Исследование предельного состояния циклической долговечности при детерминированном нерегулярном нагружении разрабатываемых материалов состоит в оценке их чувствительности к форме и последовательности блоков нагружения [3].

В отличие от распространенных на практике лабораторных испытаний с регулярным нагружением по закону «синуса» или «треугольника», эксплуатационные циклы имеют, как правило, более сложный характер [3–5]. До недавнего времени не существовало стандартной методики, конкретно касающейся практики испытаний стандартных образцов, учитывающей взаимодействие механизмов ползучести и МЦУ. Испытания на МЦУ с выдержкой в цикле проводились в течение многих лет, но достоверность и форма получаемой информации зависела от опыта и целей отдельных испытательных лабораторий [6–11]. Данная проблема решена выпуском стандарта ASTM E2714-13 по инициативе Института исследований в области электроэнергетики [12]. Проведение испытаний по данному стандарту является основой для оценки повреждений, накапливающихся в образцах в процессе испытаний на МЦУ и статических испытаний на длительную прочность. Последовательные испытания с различными режимами нагружения можно использовать для количественной оценки влияния предшествующей циклической деформации на разрушение по механизму ползучести или предшествующей деформации ползучести на усталостную долговечность. Более того, так как условия эксплуатации часто очень сложны, сбор всех данных нецелесообразен вследствие невозможности воспроизведения всех рабочих переменных в лабораторных условиях. Таким образом, для предсказания эксплуатационных характеристик необходима экстраполяция результатов, полученных в упрощенных условиях, а это возможно только тогда, когда методы экстраполяции количественно оценивают главные факторы, влияющих на ресурс изделия.

При проведении испытаний на МЦУ по различным режимам длительного нагружения наиболее актуален вопрос выбора длительности выдержки в цикле и частоты при контроле осевой деформации. Материалы, применяемые в энергооборудовании, металлургии, атомной технике и авиационных двигателях, испытывают знакопеременные деформации и выдержки до 100 мин и более [2, 3]. Целесообразность использования сложного высокотехнологичного сервогидравлического оборудования при указанных режимах экономически не оправдана, поэтому проведение испытаний на более простом техническом оборудовании и обновление существующих методик является актуальной задачей [13]. Цель данной работы состоит в рассмотрении возможности и целесообразности проведения испытаний по рассмотренным методикам для никелевых жаропрочных сплавов и сталей.

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») [14].

Материалы и методы

Проведен анализ американского стандарта ASTM E2714-13, регламентирующего проведение испытаний на усталость при выдержке в цикле. Американский стандарт ASTM устанавливает методы определения усталостных свойств материалов при одноосном нагружении в условиях контролируемых деформаций.

Проведен обзор исследований на МЦУ с выдержкой в цикле за период 1980–2020 гг. Информация получена из реферативных баз данных ScienceDirect (издательство Elsevier) [15], NTRS (сервер технических отчетов НАСА) [16], eLibrary (сервис РИНЦ – Российский индекс научного цитирования) [17].

Результаты и обсуждение

Форма цикла нагружения

Для оценки повреждаемости по механизмам усталости и ползучести стандарт ASTM предусматривает различные формы нагружения, которые схематично могут быть представлены в виде блок-схемы (рис. 1).

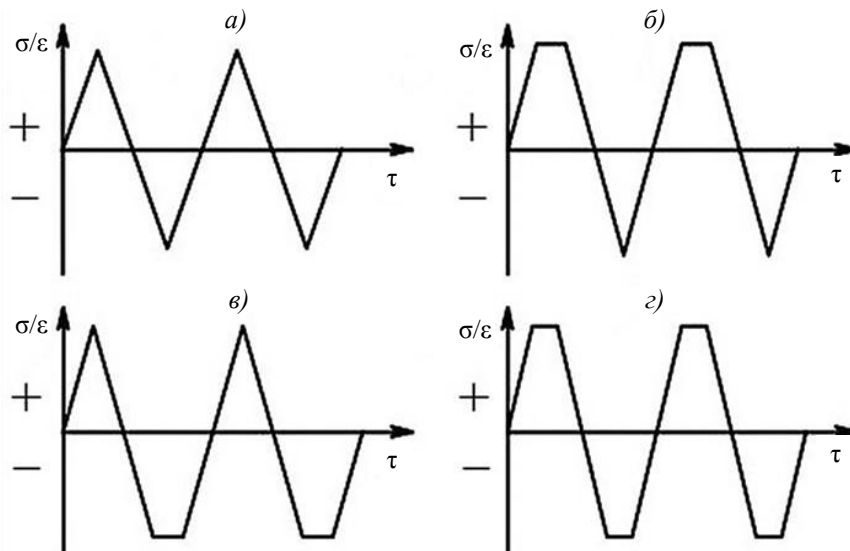


Рис. 1. Форма нагружения, при которой реализуется знакопеременная пластичность: усталость (а) и «ползучесть + усталость» с выдержкой в области растяжения (б) и сжатия (в), а также растяжения и сжатия (з)

Расчетное определение внешних нагрузок эксплуатационного цикла и термических напряжений во время теплосмен позволяет обоснованно формировать блок-схемы нагружения при испытаниях материалов на МЦУ с выдержкой в цикле.

Модели расчета повреждаемости

при взаимодействии механизмов усталости и ползучести

В целом модели расчета повреждаемости различаются по способу представления последовательности учета деформаций при циклическом и повторно-статическом нагружении. Для решения этой задачи рассматривают разрушение как процесс, развивающийся во времени. По этой причине в настоящее время широко используются модели, которые в качестве суммарного повреждения используют функции параметров цикла нагружения по механизмам усталости и ползучести, которые зависят от времени (рис. 2):

$$D_c = \sum_j \left\{ N_j \left[\frac{t_h}{t_R(\sigma_p)} \right] \right\} + \sum_j \left\{ N_j \left[\int_0^{t_h} \frac{dt}{t_R(\sigma_s)} \right] \right\}, \quad (1)$$

$$D_f = \sum_j \left\{ N_j \left[\frac{N_j}{N_i(\Delta\varepsilon_i)} \right] \right\},$$

где D_c , D_f – функция повреждаемости при ползучести и усталости соответственно; t_h – продолжительность нагружения; $t_R(\sigma_p)$, $t_R(\sigma_s)$ – предел длительной прочности первого и второго уровня нагружения соответственно; N_j – блок нагружения; $N_i(\Delta\varepsilon_i)$ – предел малоциклового усталости на базе N_i циклов.

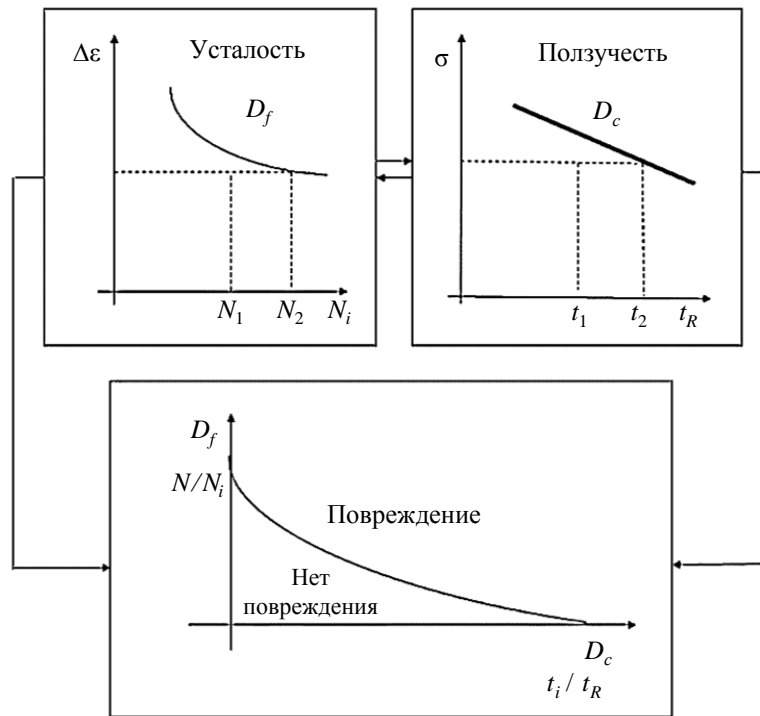


Рис. 2. Схема суммирования повреждений по механизмам усталости и ползучести

Одним из способов суммирования повреждений по механизмам усталости и ползучести является метод, в котором используют коэффициенты запаса по статической и циклической долговечности [2]. Для этого анализируют зависимость изменения во времени напряжений в типовом полетном цикле, определяют количество подциклов нагружения, средний уровень напряжений и размах деформации в каждом из них. С использованием гипотезы линейного суммирования получают соотношение для оценки долговечности $N_{\text{пц}}$ конструктивного узла ГТД:

$$N_{\text{пц}} \left(K_c \sum_{i=1}^z \frac{t_i}{t_{ip}} + K_N \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{ip}} \right) = 1, \quad (2)$$

где K_c , K_N – коэффициенты запаса по статической (2–2,5) и циклической (>5) прочности соответственно; t_i , t_{ip} – длительность выдержки на i -м режиме в полетном цикле и время до разрушения на таком режиме соответственно; n_i , N_{ip} – число подциклов, соответствующих i -му режиму в полетном цикле, и число циклов до разрушения в таком режиме соответственно; z , k – число режимов с выдержкой и число различных подциклов в полетном цикле соответственно.

Наиболее эффективным методом определения ресурса при высокотемпературной усталости считают метод разделения размаха деформации, который предложен в работе [18]. Данный метод базируется на представлении о том, что любую петлю гистерезиса можно описать посредством комбинации деформирования в двух направлениях (растяжения–сжатия), а также неупругой деформации двух типов (зависящей от времени – ползучести и не зависящей от времени – знакопеременной пластичности). При комбинировании двух направлений и двух типов неупругой деформации получают четыре характерных режима нагружения: $\Delta\epsilon_{pp}$ – обратимая пластичность (усталость – *plastic-plastic*); $\Delta\epsilon_{cc}$ – ползучесть при растяжении сменяется ползучестью при сжатии (*creep-creep*); $\Delta\epsilon_{cp}$ – ползучесть при растяжении сменяется пластичностью при сжатии (*creep-plastic*); $\Delta\epsilon_{pc}$ – пластичность при растяжении сменяется ползучестью при сжатии (*plastic-creep*) (рис. 3).

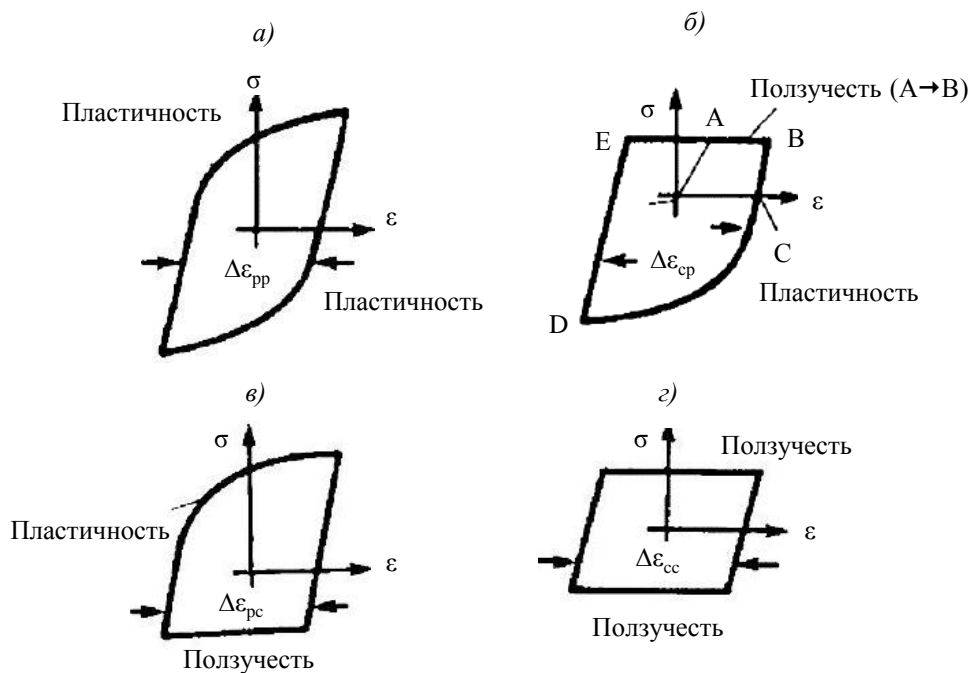


Рис. 3. Комбинации деформирования: *a* – обратимая пластичность (усталость – *plastic-plastic*); *б* – ползучесть при растяжении сменяется пластичностью при сжатии (*creep-plastic*); *в* – пластичность при растяжении сменяется ползучестью при сжатии (*plastic-creep*); *г* – ползучесть при растяжении сменяется ползучестью при сжатии (*creep-creep*). Обозначения: σ – напряжение; ϵ – деформация

Основным этапом является разделение общей диаграммы деформирования на четыре типа комбинации с получением степенного уравнения Коффина–Мэнсона для каждой из них:

$$\Delta\epsilon_{ij} = C_{ij} N_{ij}^k, \quad (3)$$

где $\Delta\epsilon_{ij}$ – размах общей деформации при *i*-м направлении деформирования (растяжение/сжатие) и *j*-м типе неупругой деформации (пластичность/ползучесть); C_{ij} , k – константы материала (параметры линии регрессии в двойных логарифмических координатах) при *i*-м направлении деформирования (растяжение/сжатие) и *j*-м типе неупругой деформации (пластичность/ползучесть); N_{ij} – количество циклов при *i*-м направлении деформирования (растяжение/сжатие) и *j*-м типе неупругой деформации (пластичность/ползучесть).

Меру общей повреждаемости представляют в виде

$$\frac{1}{N_f} = \frac{f_{pp}}{N_{pp}} + \frac{f_{cc}}{N_{cc}} + \left(\frac{f_{pc}}{N_{pc}} \leftrightarrow \frac{f_{cp}}{N_{cp}} \right), \quad (4)$$

$$f_{pp} = \frac{\Delta \varepsilon_{pp}}{\Delta \varepsilon_{in}}; f_{cc} = \frac{\Delta \varepsilon_{cc}}{\Delta \varepsilon_{in}}; f_{pc} = \frac{\Delta \varepsilon_{pc}}{\Delta \varepsilon_{in}}; f_{cp} = \frac{\Delta \varepsilon_{cp}}{\Delta \varepsilon_{in}},$$

где N_f – общая долговечность; f_{ij} – функция повреждаемости материала при i -м направлении деформирования (растяжение/сжатие) и j -м типе неупругой деформации (пластичность/ползучесть); $\Delta \varepsilon_{ij}$ – размах общей деформации при i -м направлении деформирования (растяжение/сжатие) и j -м типе неупругой деформации (пластичность/ползучесть); $\Delta \varepsilon_{in}$ – общий размах неупругой деформации.

Эффективность критерия, основанного на методе разделения деформации, проявляется при учете формы и длительности цикла, взаимного влияния растяжения и сжатия, а также расчетного соотношения двух типов неупругой деформации – пластичности и ползучести. Метод разделения деформации применен при исследовании сталей перлитного (2,25Cr–1Mo, 1Cr–1Mo–1V) и аустенитного (AISI 304, AISI 316) классов, а также сплавов на никелевой основе (Rene 80, Inconel 100) [19, 20]. В результате анализа данных в условиях длительного малоциклового нагружения получена хорошая сходимость эксперимента и расчета. Как правило, максимальная долговечность соответствует условиям процесса классической усталости ($\Delta \varepsilon_{pp}$), минимальная – условиям, при которых ползучесть при растяжении сменяется пластичностью при сжатии ($\Delta \varepsilon_{cp}$). Промежуточное положение занимают режимы, при которых ползучесть при растяжении сменяется ползучестью при сжатии ($\Delta \varepsilon_{cc}$), а пластичность при растяжении – ползучестью при сжатии ($\Delta \varepsilon_{pc}$).

Таким образом, уточнение расчетных методик при едином критерии разрушения, основанном на одновременном протекании механизмов усталости и ползучести, позволит эффективнее использовать резервы прочности конструктивных узлов.

Анализ требований, предъявляемых к образцам, оборудованию и результатам испытаний

Испытания на МЦУ с выдержкой в цикле, проводимые на гладких образцах по схеме одноосного нагружения при соответствующих температурах, размахе деформации (нагрузки) и скорости деформации (нагружения), создают условия для развития повреждений при одновременном взаимодействии механизмов ползучести и усталости. Новый стандарт ASTM E2714-13, введенный в результате инициативы Института исследований в области электроэнергетики (EPRI) [12], сочетает требования по измерению и контролю деформации и температуры, настройке соосности, а также рекомендации по обработке данных. В частности, температуру в рабочей части образца необходимо контролировать с погрешностью, не превышающей 2 °С и ±1 % от заданного максимального значения температуры, в течение всего процесса испытаний. В целом в части разделов по требованиям к образцам и оборудованию данный стандарт повторяет требования разделов, указанных в стандарте ASTM E606. Выводы, сделанные при сравнении российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость, приведены в работе [21]. Рассмотрение методических особенностей при классических испытаниях на усталость в части основных определений, параметров нагружения и представления результатов приведено в работах [22–25]. Особое внимание в американском стандарте

ASTM E2714-13 уделяется обработке изменчивости механической петли гистерезиса после испытаний, так как при данном нагружении помимо переходных процессов циклического упрочнения или разупрочнения реализуются процессы релаксации напряжений и ползучести.

Испытания на МЦУ с выдержкой в цикле могут проводиться при управлении по нагрузке или деформации. Форма упругопластического гистерезиса при этом кардинально различается (рис. 4). При «жестком» нагружении с выдержкой в цикле реализуются процессы релаксации напряжений, при «мягком» – процессы ползучести.

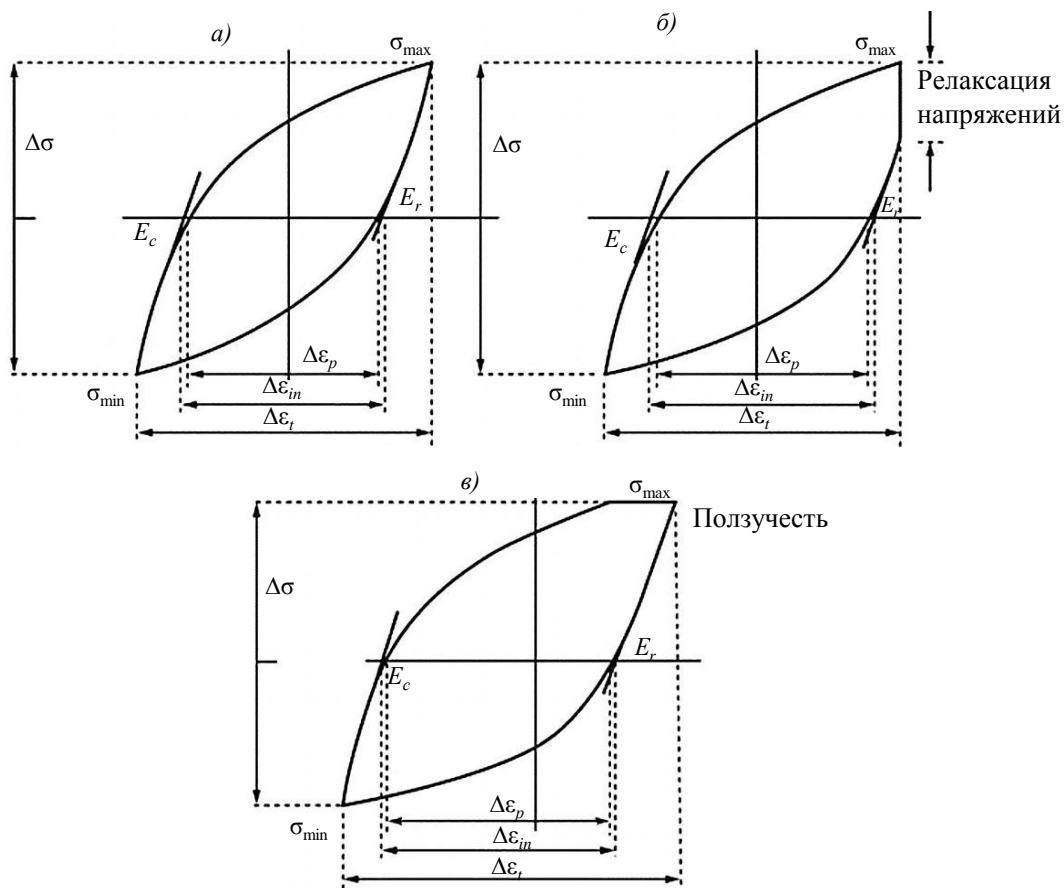


Рис. 4. Форма упругопластического гистерезиса при малоциклового усталости (МЦУ; *a*) и при МЦУ с выдержкой при «жестком» (*б*) и «мягком» цикле (*в*). Обозначения: E_r , E_c – нормальный модуль упругости при растяжении и сжатии соответственно; σ , $\Delta\sigma$, σ_{\max} , σ_{\min} – напряжение, размах напряжений, максимальное и минимальное напряжения соответственно; $\Delta\epsilon_{in}$, $\Delta\epsilon_p$, $\Delta\epsilon_t$ – размах неупругой деформации, размах пластической деформации, размах общей деформации соответственно

При управлении по деформации образцов на МЦУ изменчивость упругопластического деформирования характеризуется удовлетворительной воспроизводимостью и исключает переходные процессы накопления односторонних деформаций, которые приводят к упрочнению и последующему разупрочнению. Преимущество режима управления по деформации («жесткий» режим) при испытании лабораторных образцов обусловлено еще и тем, что в реальных конструкциях в зонах действия максимальных напряжений реализуется схема нагружения, в большей степени соответствующая «жесткому» режиму циклического нагружения.

Обзор исследований на малоцикловую усталость с выдержкой в цикле

Для оценки влияния характерных для дисков турбин особенностей формы цикла нагружения (закона изменения во времени напряжений) на характеристики МЦУ проведена серия экспериментов с использованием лабораторных образцов в АО «ОДК-Авиадвигатель» [11]. В работе рассмотрены два варианта цикла нагружения: треугольный цикл типа 0–max–0 (рис. 5, а) и М-образный цикл 0–max–min–max–0 (рис. 5, б).

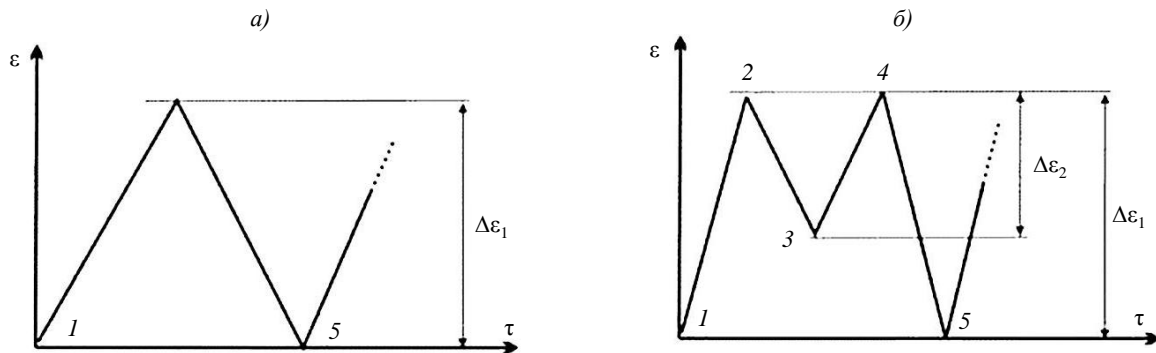


Рис. 5. Варианты цикла нагружения (а – треугольного; б – М-образного) при испытаниях на малоцикловую усталость

Установлено, что при одинаковом размахе деформаций $\Delta\varepsilon_1$ долговечность в случае М-образного цикла нагружения меньше, чем для треугольного за счет повреждения, получаемого в подцикле с размахом $\Delta\varepsilon_2$. Это различие увеличивается с ростом циклической долговечности и составляет 15–30 %.

В работе специалистов ПАО «ОДК-Сатурн» [9] проведены исследования влияния на долговечность увеличения длительности отнулевого цикла нагружения образцов с выдержкой на максимальном и минимальном уровнях: $\tau_{\max} = 120$ с и $\tau_{\min} = 60$ с. Экспериментальные исследования проводили при эксплуатационной температуре на стандартных круглых образцах из материала ЭП609Ш ($\sigma_{\text{плц}} = 600$ МПа, $\sigma_{0,2} = 686$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 743$ МПа), используемого для изготовления дисков компрессора высокого давления. При анализе результатов испытаний отмечено явление циклического упрочнения, заключающегося в увеличении пластических свойств (относительного сужения ψ материала), циклической и статической долговечности при напряжениях, существенно превышающих предел текучести. Гипотеза о линейном суммировании статической и циклической составляющих повреждений не подтвердилась, так как при проведении испытания по режиму «мягкого» цикла в материале наблюдаются переходные процессы накопления односторонних деформаций, приводящие к упрочнению и последующему разупрочнению.

В обзорной статье по высокотемпературной усталости с выдержкой в цикле приведены диаграммы чувствительности нескольких марок жаропрочных никелевых сплавов: Mar M002, Waspaloy, Rene 95, Rene 80, Inconel 617 [8]. Диаграмма чувствительности сплава MAR M002 (рис. 6, а) описывает его поведение при высокотемпературной усталости при температурах 750, 850, 1000 и 1040 °С и длительности выдержки от 20 до 300 с. При температуре 750 °С нормализованная усталостная долговечность (отношение усталостной долговечности при регулярном нагружении к усталостной долговечности с выдержкой в цикле) при выдержке 20 с в области сжатия составила 0,25, в области растяжения 0,8, в области симметричного «растяжения–сжатия» 0,71. При температуре 850 °С весь диапазон нормализованной усталостной долговечности составил от 0,92 до 2,66. Значения нормализованной усталостной долговечности для

выдержки в области сжатия схожи со значениями в области «растяжения–сжатия» с небольшой разницей, заключающейся в повышенной повреждаемости материала при этом процессе. При температуре 1040 °С выдержка в области сжатия оказала сопоставимое с нагружением без выдержки влияние на усталостную долговечность. Диаграмма чувствительности сплава Inconel 617 (рис. 6, б) описывает его поведение при высокотемпературной усталости при температуре 950 °С и длительности выдержки от 5 до 7200 с. Наименьшей долговечностью характеризуется режим нагружения с выдержкой в области растяжения и длительностью 7200 с. По мере уменьшения продолжительности выдержки в области растяжения долговечность увеличивается. При симметричной выдержке в области растяжения и сжатия длительностью 30 с мера повреждаемости оказалась самой минимальной.

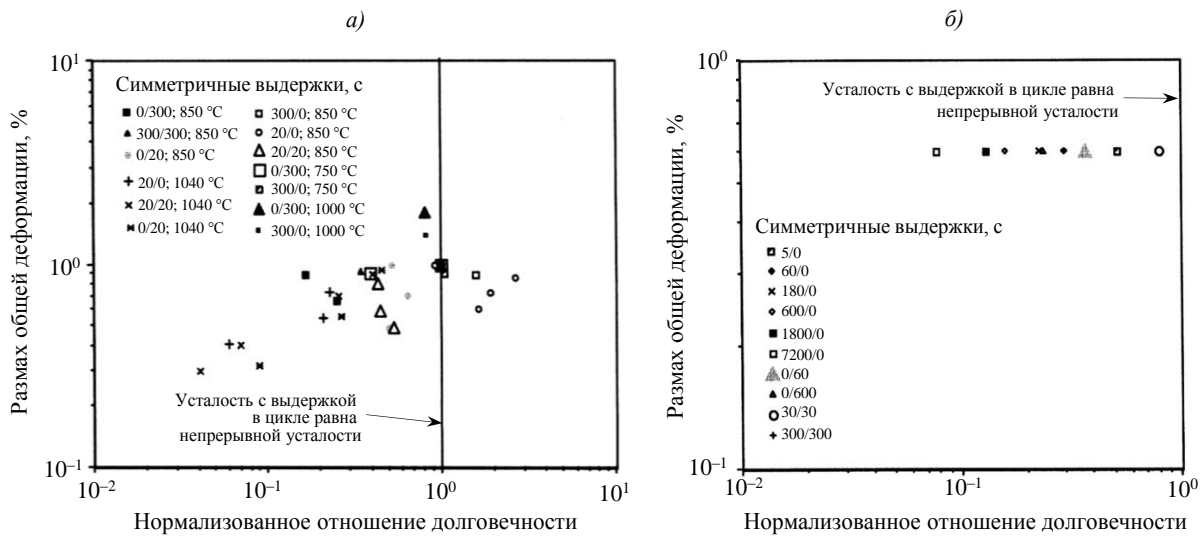


Рис. 6. Диаграмма чувствительности к выдержке сплавов MAR M002 (а) и Inconel 617 (б)

Диаграмма чувствительности сплава Waspaloy (рис. 7, б) описывает его поведение при высокотемпературной усталости при температуре 750 °С и длительности выдержки от 30 до 100 с. При нормализованной усталостной долговечности от 0,2 до 0,4 диапазону общей деформации от 0,3 до 1 % принадлежат все результаты испытаний по различным режимам выдержек при указанной температуре. Для выдержки длительностью 30 с в области растяжения наблюдается асимптотическое стремление меры повреждаемости от 0,6 к 0,35 при уменьшении общей деформации с 1 до 0,2 %, что указывает на уменьшение влияния выдержки в области растяжения при малых уровнях общей деформации. Для случая симметричных выдержек в области растяжения и сжатия наблюдается почти линейная зависимость увеличения нормализованной усталостной долговечности от увеличения общей деформации. При нагружении, в котором реализована комбинация выдержки 100 с в области растяжения и 10 с в области сжатия, мера повреждаемости больше, чем при нагружении с выдержкой 30 с в области сжатия, что указывает на залечивающий эффект выдержки в области сжатия. При выдержке 30 с в области сжатия усталостная долговечность оказалась самой минимальной. Диаграмма чувствительности сплава Rene 95 для лопаток (рис. 7, а) описывает его поведение при высокотемпературной усталости при температуре 650 °С и длительности выдержки от 60 до 600 с с различной скоростью нагружения. По сравнению со сплавом Waspaloy у сплава Rene 95 наблюдаются практически те же особенности меры повреждаемости, с той лишь разницей, что испытания проведены при более высоких уровнях

общей деформации. При увеличении скорости деформирования проявляется сильное влияние на усталостную повреждаемость при длительных симметричных выдержках (600 с/600 с) – при скорости $0,69 \text{ с}^{-1}$ мера повреждаемости больше, чем при скорости $1,5 \text{ с}^{-1}$.

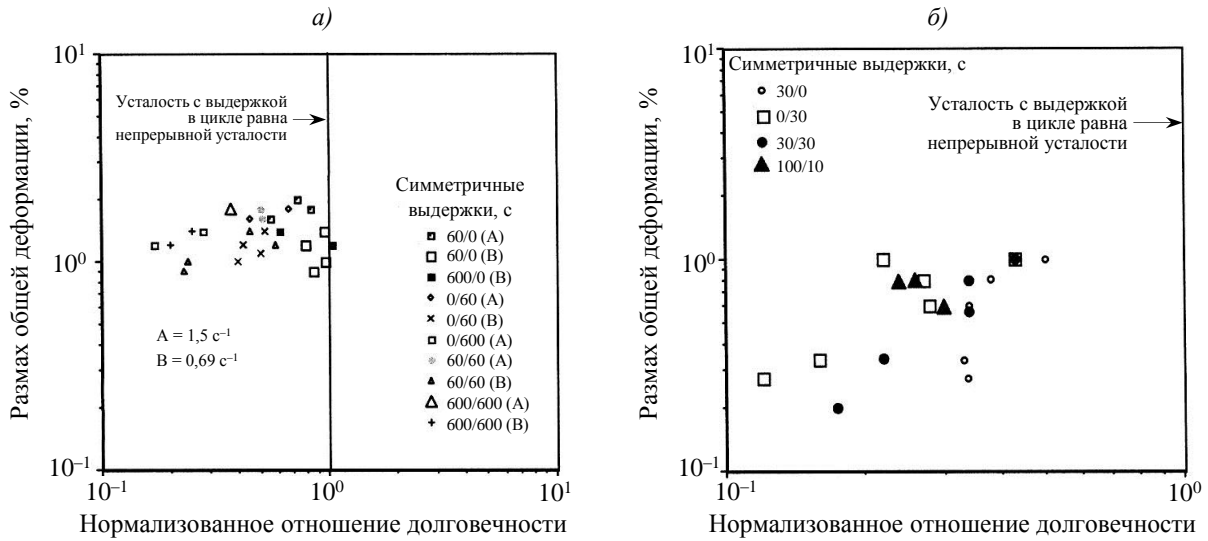


Рис. 7. Диаграмма чувствительности к выдержке сплавов Rene 95 (а) и Waspaloy (б)

Диаграмма чувствительности сплава Rene 80 (рис. 8) описывает его поведение при высокотемпературной усталости при температурах 871 и 1000 °С и длительности выдержки от 47 до 200 с. При температуре 871 °С наибольшей долговечностью характеризуются режимы нагружения с выдержкой в области растяжения и симметричной выдержкой в области растяжения и сжатия, наименьшей долговечностью – режимы нагружения с различными по времени выдержками в области сжатия и продолжительными (>190 с) выдержками в области растяжения. При температуре 1000 °С режим с выдержкой 120 с в области растяжения оказался наиболее повреждающим.

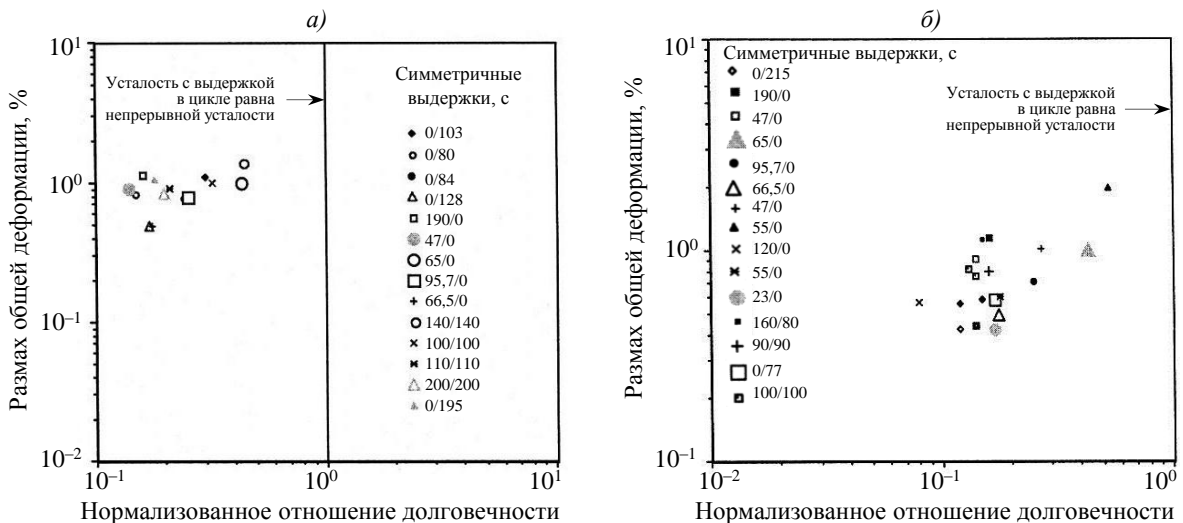


Рис. 8. Диаграмма чувствительности к выдержке сплава Rene 80 при температурах 871 (а) и 1000 °С (б)

Фрактографические исследования высокотемпературной усталости с выдержкой в цикле

В рамках гранта DMR-052131 [26] Министерства энергетики США проводилась разработка оптимальной микроструктуры сплава Inconel 617 для сопротивления высокотемпературной усталости с длительными выдержками в цикле. Испытания на МЦУ проводили при температуре 950 °С с длительностью выдержки от 1800 до 9000 с при максимальной деформации в области растяжения. Синусоидальное нагружение общей деформации проводили при симметричном цикле. Существенное повреждающее влияние длительности выдержки при высокой температуре проявляется в образовании оксидов различной морфологии, расположенных по границам зерен. В качестве информации для описания деградации структуры в работе [26] приводятся данные о продолжительности испытания, толщине образовавшихся оксидов и протяженности поверхностных трещин.

Для анализа распределения трещин в объеме образца испытания прерывали для фиксации состояния при ресурсе 50, 90 и 95 % от общей долговечности. По данным, полученным при непрерывном циклическом нагружении, установлено, что приблизительно половина циклической долговечности расходуется на возникновение трещины. При циклическом нагружении с длительными выдержками наблюдается образование коротких поверхностных трещин, при этом образование магистральной трещины наблюдается при ресурсе 75 % от общей долговечности. Условие, регулирующее скорость разрушения при ползучести и усталости, должно учитывать:

- распространение короткой трещины, обогащенной оксидами и образующейся на начальной стадии;
- рост и объединение внутриграницных пор при ползучести (релаксации напряжений);
- комбинацию вышеуказанных условий.

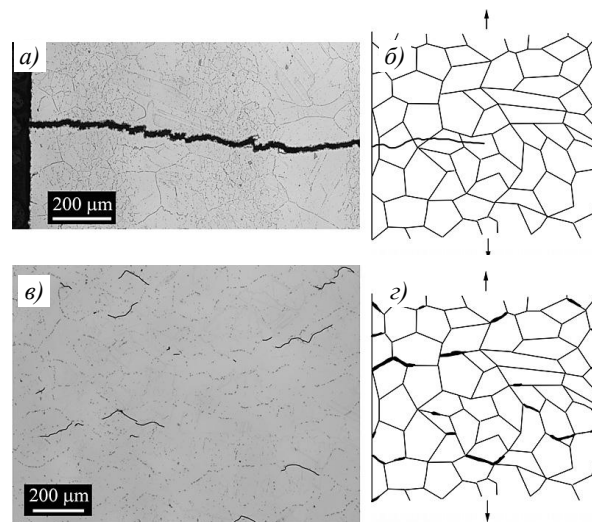


Рис. 9. Фрактографическое изображение при регулярном усталостном нагружении (а) с амплитудой деформации 0,3 % при температуре 950 °С и его схематичное представление (б), а также фрактографическое изображение при усталостном нагружении с выдержкой 9000 с (в) с амплитудой деформации 1 % при температуре 950 °С и его схематичное представление (г)

Приводя детальное описание фрактографических снимков (рис. 9) разрушений в условиях МЦУ, разработчики сплава Inconel 718 с новой текстурой указывают [26], что при действии растягивающей деформации ползучести происходит рост круглых пор,

которые в условиях знакопеременной деформации превращаются в плоские трещины и, как результат, вызывают появление локальных центров концентрации напряжений на границах зерен, приводящих к ускоренному разрушению.

На процессы разрушения при рассмотрении температурных эффектов во времени также оказывает влияние среда испытания (воздух/вакуум). Среди основных выводов, сделанных по результатам сравнительных испытаний на воздухе и в вакууме, следует отметить наиболее важные:

- сопротивление усталости в вакууме больше, чем на воздухе;
- выдержка в области сжатия при испытаниях в вакууме не оказывает влияния на сопротивление усталости;
- снижение долговечности в вакууме наблюдается при длительных выдержках в области растяжения и пропорционально увеличению размаха деформации.

В работах [8, 19, 20] для жаропрочных никелевых сплавов и сталей отмечено, что механизм ускорения стадии образования трещин вследствие повреждения поверхностных оксидных пленок является преобладающим. Дальнейшее развитие зародышевых дефектов зависит от предыдущего состояния системы (свойство автотемпературности процесса накопления повреждений).

Заключения

Представленная часть обзора по исследованию МЦУ с выдержкой в цикле жаропрочных металлических материалов является лишь введением в этот актуальный раздел механики поврежденности. Показано, что отличительной чертой МЦУ с выдержкой в цикле является влияние вида нагружения («жесткий»/«мягкий» цикл) на протекающие процессы релаксации напряжений или ползучести. При анализе накопления повреждений по механизмам длительного статического и циклического нагружения уточнение расчетных методик при едином критерии разрушения позволит эффективнее использовать резервы прочности конструктивных узлов. Приведенный обзор научно-технической литературы, который не может быть исчерпывающим вследствие большого количества проводимых исследований, позволяет предположить, что экспериментальные результаты, полученные по методу ASTM E2714-13, имеют цель верифицировать теоретические идеи континуальной механики поврежденности, которые развиваются путем создания математических моделей накопления повреждений на макро-, мезо- и микроуровнях. Дальнейшее развитие механики поврежденности будет зависеть от эффективности комплекса вычислительных программ, у которых в качестве определяющих соотношений будут использованы меры поврежденности, сочетающих процессы усталости и ползучести.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 464 с.
2. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. М.: Машиностроение, 2007. 204 с.
3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
5. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. 528 с.
6. Sulak I., Obrtlík K. Effect of tensile dwell on high-temperature low-cycle fatigue and fracture behaviour of cast superalloy MAR-M247 // Engineering Fracture Mechanics. 2017. Vol. 185. P. 92–100. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.002.

7. Sun L., Bao X.-G., Guo S.-G. et al. The creep-fatigue behavior of a nickel-based superalloy: Experiments study and cyclic plastic analysis // *International Journal of Fatigue*. 2021. Vol. 147. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106187.
8. Goswami T., Hanninen H. Dwell effects on high temperature fatigue behavior. Part I // *Materials and Design*. 2001. Vol. 22. Is. 3. P. 199–215.
9. Букатый С.А., Округин А.А. Исследование циклической долговечности материала в условиях малоциклового усталости и длительной прочности // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2014. № 5 (47), ч. 4. С. 142–150.
10. Manson S.S., Halford G.R., Hirschberg M.H. Creep-fatigue analysis by strain-range partitioning // *Technical paper. National Pressure Vessel and Piping Conference*. San Francisco, 1971. P. 1–17.
11. Иноземцев А.А., Ратчиев А.М., Нихамкин М.Ш. и др. Малоцикловая усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин // *Тяжелое машиностроение*. 2011. № 4. С. 30–33.
12. ASTM E2714-13. Standard Test Method for Creep-Fatigue Testing. ASTM International, 2020. DOI: 10.15.20/E2714-13R13.
13. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // *Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб.*, 2019. Т. 4. С. 24.
14. 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.
15. База данных ресурсов издательства Elsevier. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата обращения: 20.10.2021).
16. База данных технических отчетов Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (NASA). URL: <https://ntrs.nasa.gov> (дата обращения: 20.10.2021).
17. База данных ресурсов РИНЦ. URL: <https://www.elibrary.ru> (дата обращения: 20.10.2021).
18. Manson S.S., Halford G.R. *Fatigue and Durability of Structural Materials*. ASM International, 2006. 456 p.
19. Morishita M., Asada Y., Ispikawa A. An Evaluation of Creep-Fatigue of 304 Stainless Steel in Very Vacuum Environment // *Bulletin of ASME*. 1985. Vol. 6. No. 235. P. 7–12.
20. Miller D.A., Priest R.H., Ellison E.G. A Review of Material response and life prediction techniques under fatigue creep loading conditions // *Journal of High Temperature and Process*. 1984. Vol. 6. No. 3, 4. P. 155–194.
21. Беляев М.С., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов // *Труды ВИАМ*. 2014. № 9. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.
22. 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.
23. 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: 10.12.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
24. 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: 03.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.

25. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
26. Carroll L.J., Cabet C., Carroll M.C., Wright R.N. The development of microstructural damage during high temperature creep – fatigue of a nickel alloy // *International Journal of Fatigue*. 2013. Vol. 47. P. 115–125. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.07.016.

References

1. Kablov E.N., Golubovsky E.R. *Heat resistance of nickel alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1998, 464 p.
2. Inozemtsev A.A., Nikhhamkin M.A., Sandratsky V.L. *Gas turbine engines*. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 204 p.
3. Kogaev V.P. *Calculations for strength at stresses that are variable in time*. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 364 p.
4. Kablov E.N. Materials of a new generation – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellect i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14). pp. 16–21.
5. Makhutov N.A. *Strength and safety. Fundamental and applied research*. Novosibirsk: Nauka, 2008, 528 p.
6. Sulak I., Obrtlík K. Effect of tensile dwell on high-temperature low-cycle fatigue and fracture behavior of cast superalloy MAR-M247. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, vol. 185, pp. 92–100. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.002.
7. Sun L., Bao X.-G., Guo S.-G. et al. The creep-fatigue behavior of a nickel-based superalloy: Experiments study and cyclic plastic analysis. *International Journal of Fatigue*, 2021, vol. 147. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106187.
8. Goswami T., Hanninen H. Dwell effects on high temperature fatigue behavior. Part I. *Materials and Design*, 2001, vol. 22, is. 3, pp. 199–215.
9. Bukaty S.A., Okrugin A.A. Study of the cyclic durability of the material under conditions of low-cycle fatigue and long-term strength. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2014, no. 5 (47), part 4, pp. 142–150.
10. Manson S.S., Halford G.R., Hirschberg M.H. Creep-fatigue analysis by strain-range partitioning. Technical paper. *National Pressure Vessel and Piping Conference*. San Francisco, 1971, pp. 1–17.
11. Inozemtsev A.A., Ratchiev A.M., Nikhamkin M.Sh. Low-cycle fatigue and cyclic crack resistance of a nickel alloy under loading characteristic of turbine disks. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2011, no. 4, pp. 30–33.
12. *ASTM E2714-13. Standard Test Method for Creep-Fatigue Testing*. ASTM International, 2020. DOI: 10.15.20/E2714-13R13.
13. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
14. 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 tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
15. *Elsevier Publishing Resource Database*. Available at: <https://www.sciencedirect.com> (accessed: October 20, 2021).
16. *National Aeronautics and Space Administration (NASA) Technical Reports Database*. Available at: <https://ntrs.nasa.gov> (accessed: October 20, 2021).
17. *Database of RSCI resources*. Available at: <https://www.elibrary.ru> (accessed: October 20, 2021).
18. Manson S.S., Halford G.R. *Fatigue and Durability of Structural Materials*. ASM International, 2006. 456 p.
19. Morishita M., Asada Y., Ispikawa A. An Evaluation of Creep-Fatigue of 304 Stainless Steel in Very Vacuum Environment. *Bulletin of ASME*, 1985, vol. 6, no. 235, pp. 7–12.

20. Miller D.A., Priest R.H., Ellison E.G. A Review of Material response and life prediction techniques under fatigue creep loading conditions. *Journal of High Temperature and Process*, 1984, vol. 6, no. 3, 4, pp. 155–194.
21. Belyaev M.S., Khvatskiy K.K., Gorbovets M.A. Comparative analysis of national standards of RF and the USA on methods of metals fatigue testing. *Trudy VIAM*, 2014, no. 9, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 21, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.
22. 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.
23. 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: December 12, 2021). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-1-80-94.
24. 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: November 3, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
25. Lutsenko A.N., Slavin A.V., Erasov V.S., Khvackij K.K. Strength tests and researches of aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
26. Carroll L.J., Cabet C., Carroll M.C., Wright R.N. The development of microstructural damage during high temperature creep – fatigue of a nickel alloy. *International Journal of Fatigue*, 2013, vol. 47, pp. 115–125. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.07.016.

Информация об авторах

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

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

Карашаев Мухамед Муаедович, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

Mikhail A. Gorbovets, Deputy 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

Muhamed M. Karashaev, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 15.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.02.2022.

The article was submitted 15.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 16.02.2022.