

УДК 539.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ
ПРИ БЛОЧНОМ НЕСИММЕТРИЧНОМ
МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ***

© 2018 г. **Волков И.А.^{1,2}, Игумнов Л.А.², Тарасов И.С.¹,
Шишулин Д.Н.³, Маркова М.Т.¹**

¹*Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

²*Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

³*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация*

pmptmvgavt@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.02.2018

Рассматриваются процессы пластического деформирования и накопления повреждений в поликристаллических конструкционных сплавах при блочном нестационарном несимметричном циклическом нагружении. С позиции механики поврежденной среды развита математическая модель, описывающая процессы упругопластического деформирования и накопления повреждений при малоцикловом нагружении. Модель состоит из трех взаимосвязанных частей: соотношений, определяющих упругопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения; уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений; критерия прочности поврежденного материала.

В качестве определяющих соотношений пластичности используется модифицированная модель Ю. Г. Коротких. Модификация модели заключается в использовании другой формулировки эволюционных уравнений для смещения центра поверхности текучести (тензора микронапряжений) для описания эффекта посадки петли пластического гистерезиса при жестком нестационарном несимметричном циклическом нагружении.

Предложен вариант кинетических уравнений накопления повреждений, основанный на введении скалярного параметра поврежденности, базирующийся на энергетических принципах и учитывающий основные эффекты образования, роста и слияния микродефектов при произвольных сложных режимах малоциклового нагружения.

Для оценки достоверности и определения границ применимости определяющих соотношений проведены численные исследования процессов пластического деформирования и накопления повреждений в ряде конструкционных сталей при малоцикловых испытаниях и выполнено сравнение полученных численных результатов с данными натурных экспериментов. Показано,

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-08-00881).

что предлагаемая модель механики поврежденной среды качественно и с необходимой для практических расчетов точностью количественно описывает основные эффекты процессов пластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при блочном нестационарном несимметричном малоцикловом нагружении.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, пластическая деформация, поврежденность, блочное несимметричное нагружение, механика поврежденной среды, моделирование, численный и натурный эксперименты.

Введение

Для достоверной оценки прочности и ресурса элементов и узлов несущих конструкций при знакопеременных комбинированных термомеханических воздействиях важное значение имеют циклические свойства конструкционных материалов. Расчет ресурса конструктивных элементов на базе конечно-элементного анализа неупругих деформаций в опасных зонах элементов требует формулировки определяющих соотношений термопластичности, учитывающих реальные циклические свойства материалов [1].

В настоящее время экспериментальному изучению закономерностей циклических процессов деформирования уделяется повышенное внимание. Выяснено, что стационарному циклическому деформированию (если оно имеет место) предшествует переходная стадия, определяемая циклическим упрочнением, разупрочнением или релаксацией памяти материала о предшествующей циклической истории деформирования. Параметры стабилизированной петли пластического гистерезиса не зависят от места стабилизации петли. При несимметричном циклическом деформировании материала может наблюдаться одностороннее накопление пластической деформации. При жестком циклическом нагружении с начальной анизотропией по амплитуде напряжений в полциклах растяжения и сжатия наблюдается релаксация средних напряжений цикла до нуля за конечное число циклов нагружения. При одновременном действии механических нагрузок и температуры, изменение которых не совпадает по фазе, процессы циклического изменения напряжений, полных и пластических деформаций являются многоосными и непропорциональными, что приводит к дополнительным эффектам циклического поведения материалов. Результаты экспериментальных исследований этих процессов показывают, что поведение конструкционных материалов при циклическом пропорциональном нагружении существенно отличается от поведения при монотонных процессах деформирования (закономерности циклического упрочнения в значительной степени отличаются от закономерностей монотонного деформирования). В свою очередь, многоосные непропорциональные циклические процессы существенно отличаются от пропорциональных циклических процессов [2–10].

Уравнения состояния, построенные на базе монотонных процессов нагружения и не учитывающие особенности циклического деформирования при пропорциональных и непропорциональных нагружениях, могут привести к большим ошибкам в определении основных параметров напряженно-деформированного состояния, используемых затем для оценки ресурсных характеристик материала. Формулировка достоверных определяющих соотношений термопластичности для указанных процессов требует, прежде всего, экспериментальных исследований эффектов циклического поведения конструкционных материалов при пропорциональных и непропорциональных нагружениях [11–16].

Классические методы предсказания усталостной долговечности материалов при помощи полуэмпирических формул (правил), основанные на анализе процесса деформирования и связывающие параметры петель пластического гистерезиса с числом циклов до разрушения, требуют большого количества экспериментальной информации и справедливы только для узкого класса режимов нагружения в пределах имеющейся базовой экспериментальной информации [17].

В последние годы для решения таких задач успешно развивается новое научное направление – механика поврежденной среды (МПС) [18, 19]. МПС изучает процессы развития микродефектов, механическое поведение поврежденных материалов посредством описания влияния распределенных микродефектов при помощи определенных механических параметров и образование макроскопических трещин (процессы накопления повреждений), сочетая, насколько это возможно на современном уровне знаний, точки зрения материаловедения и механики сплошной среды. Существующая на сегодняшний день практика использования уравнений МПС для различных механизмов исчерпания ресурса позволяет утверждать, что такой подход достаточно эффективен для практических приложений оценки ресурсных характеристик материала, и с его помощью можно достаточно корректно оценивать процесс исчерпания ресурса конструктивных элементов и узлов несущих конструкций.

В [11, 19] развита математическая модель МПС, описывающая процессы сложного пластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при монотонных и циклических пропорциональных и непропорциональных режимах термомеханического нагружения. В настоящей статье используется модифицированная модель МПС [11, 19] для описания процессов пластического деформирования и накопления усталостных повреждений в нержавеющей сталях (12Х18Н10Т, 12Х18Н9) при блочном нестационарном несимметричном малоцикловом нагружении. Полученные численные результаты сравниваются с данными натурных экспериментов и численными результатами, полученными другими авторами [20].

1. Определяющие соотношения механики поврежденной среды

Модель поврежденной среды, развитая в [11, 19], состоит из трех взаимосвязанных составных частей:

- соотношений, определяющих упругопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения;
- эволюционных уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений;
- критерия прочности поврежденного материала.

Определяющие соотношения пластичности

Определяющие соотношения пластичности, предложенные Ю.Г. Коротких [11, 12, 21], базируются на следующих основных положениях:

- компоненты тензоров деформаций e_{ij} и скоростей деформаций \dot{e}_{ij} включают в себя упругие e_{ij}^e , \dot{e}_{ij}^e и пластические e_{ij}^p , \dot{e}_{ij}^p деформации, то есть обратимые и необратимые составляющие;
- начальная поверхность текучести для различных температур описывается поверхностью в форме Мизеса. Эволюция изменения поверхности текучести описывается изменением ее радиуса C_p и перемещением ее центра p_{ij} ;
- изменение объема тела происходит упруго;

– рассматриваются начально-изотропные среды. Учитывается только анизотропия, вызванная процессами пластичности.

В упругой области связь между шаровыми и девиаторными составляющими тензоров напряжений и деформаций и их скоростей устанавливается с помощью закона Гука:

$$\begin{aligned}\sigma &= 3K[e - \alpha(T - T_0)], & \sigma_{ij} &= 2Ge'_{ij}, \\ \dot{\sigma} &= 3K(\dot{e} - \dot{\alpha}T - \alpha\dot{T}) + \frac{\dot{K}}{K}\sigma, & \dot{\sigma}'_{ij} &= 2G\dot{e}'_{ij} + \frac{\dot{G}}{G}\sigma'_{ij},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\sigma, \dot{\sigma}, e, \dot{e}$ – шаровые, а $\sigma'_{ij}, \dot{\sigma}'_{ij}, e'_{ij}, \dot{e}'_{ij}$ – девиаторные составляющие тензоров напряжений σ_{ij} , деформаций e_{ij} и их скоростей $\dot{\sigma}_{ij}, \dot{e}_{ij}$; T – температура, T_0 – начальная температура, $K(T)$ – модуль объемного сжатия, $G(T)$ – модуль сдвига, $\alpha(T)$ – коэффициент линейного температурного расширения материала.

Для описания эффектов монотонного и циклического деформирования вводится поверхность текучести:

$$F_s = S_{ij}S_{ij} - C_p^2 = 0, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}. \quad (2)$$

Для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве напряжений вводится поверхность циклической «памяти». Уравнение поверхности «памяти»:

$$F_p = \rho_{ij}\rho_{ij} - \rho_{\max}^2 = 0, \quad (3)$$

где ρ_{\max} – максимальный за историю нагружения модуль ρ_{ij} .

В диапазоне температур T , в котором эффекты отжига незначительны, принимается, что изотропное упрочнение (эволюция C_p) состоит из трех типов: монотонного, циклического и связанного с изменением температуры T . Конкретизация эволюционного уравнения для радиуса поверхности текучести имеет вид [11, 12]:

$$\dot{C}_p = [q_\chi H(F_p) + a(Q_s - C_p)\Gamma(F_p)]\dot{\chi} + q_3\dot{T}, \quad (4)$$

$$C_p = C_p^0 + \int_0^t \dot{C}_p dt, \quad \dot{\chi} = \left(\frac{2}{3} \dot{e}'_{ij} \dot{e}'_{ij} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$\chi_m = \int_0^t \dot{\chi} H(F_p) dt, \quad \chi = \int_0^t \dot{\chi} dt,$$

$$q_\chi = \frac{q_2 A \psi_1 + (1-A)q_1}{A\psi_1 + (1-A)}, \quad Q_s = \frac{Q_2 A \psi_2 + (1-A)Q_1}{A\psi_2 + (1-A)}, \quad 0 \leq \psi_i \leq 1, \quad i = 1, 2,$$

$$A = 1 - \cos^2 \theta, \quad \cos \theta = n_{ij}^e n_{ij}^s, \quad n_{ij}^e = \frac{\dot{e}'_{ij}}{(\dot{e}'_{ij} \dot{e}'_{ij})^{1/2}}, \quad n_{ij}^s = \frac{S_{ij}}{(S_{ij} S_{ij})^{1/2}}, \quad (6)$$

$$H(F_p) = \begin{cases} 1, & F_p = 0 \wedge \rho_{ij} \dot{\rho}_{ij} \geq 0, \\ 0, & F_p < 0 \vee \rho_{ij} \dot{\rho}_{ij} < 0, \end{cases} \quad \Gamma(F_p) = 1 - H(F_p).$$

Здесь q_1, q_2, q_3 – модули монотонного изотропного упрочнения; Q_1 и Q_2 – модули циклического изотропного упрочнения; a – постоянная, определяющая скорость переходного процесса к стационарному состоянию петли гистерезиса циклического деформирования материала; Q_s – стационарное значение радиуса поверхности текучести при данных ρ_{\max} и T ; C_p^0 – начальное значение радиуса поверхности текучести.

В исследованиях Ю.Г. Коротких эволюция внутренней переменной ρ_{ij} принимается в виде [21]:

$$\dot{\rho}_{ij} = f(\chi)[g_1 \dot{e}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \dot{\chi}] + g_T \rho_{ij} \langle \dot{T} \rangle + \dot{\rho}_{ij}^*, \quad (7)$$

$$g_T = \frac{1}{g_1} \left(\frac{\partial g_1}{\partial T} - \frac{g_1}{g_2} \frac{\partial g_2}{\partial T} \right), \quad f(\chi) = 1 + k_1(1 - e^{-k_2 \chi}), \quad (8)$$

где g_1, g_2, g_T, k_1 и k_2 – экспериментально определяемые материальные параметры. Здесь и далее для любой величины B , заключенной в угловые скобки, выполняются условия

$$\langle B \rangle = \begin{cases} B & \text{при } B > 0, \\ 0 & \text{при } B \leq 0. \end{cases}$$

В формуле (7) первый и второй члены описывают анизотропную часть деформационного упрочнения, третий – эволюцию ρ_{ij} в результате изменения температуры T , а четвертый – анизотропное упрочнение, связанное с односторонне накапливаемой пластической деформацией. Весовой множитель $f(\chi)$ позволяет описать эволюцию ρ_{ij} при циклических режимах деформирования.

Для конкретизации члена $\dot{\rho}_{ij}^*$ в [11, 12] вводится внутренний параметр ξ_{ij} , при монотонных нагружениях характеризующий односторонне накапливаемую пластическую деформацию, и в пространстве деформаций вводится поверхность $F_e = (e_{ij}^p - \xi_{ij})(e_{ij}^p - \xi_{ij}) - e_{\max}^2 = 0$ (e_{\max} – интенсивность максимальной амплитуды пластической деформации) для описания эффекта стабилизации петли пластического гистерезиса при мягком несимметричном нагружении (в общем случае закономерности изменения поверхностей F_s, F_p в пространстве напряжений и поверхности F_e в пространстве деформаций должны быть согласованы, так как их изменение определяет общие закономерности поведения материала).

В настоящей статье модификация модели термопластичности Ю.Г. Коротких осуществляется за счет другой (более простой) конкретизации соотношения (7).

Постулируется, что эволюция внутренней переменной ρ_{ij} принимается в виде:

$$\dot{\rho}_{ij} = f(\chi_m)[g_1 \dot{e}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \dot{\chi}] + g_T \rho_{ij} \langle \dot{T} \rangle + \dot{\rho}_{ij}^*, \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad (9)$$

$$f(\chi_m) = 1 + k_1(1 - e^{-k_2 \chi_m}), \quad \dot{\rho}_{ij}^* = g_3 \dot{e}_{ij}^p H(F_p) - g_4 \rho_{ij}^* \dot{\chi} \Gamma(F_p) \langle \cos \gamma \rangle, \quad (10)$$

$$\cos \gamma = \frac{\dot{\rho}_{ij} \rho_{ij}^*}{(\dot{\rho}_{ij} \dot{\rho}_{ij})^{1/2} (\rho_{ij}^* \rho_{ij}^*)^{1/2}}, \quad (11)$$

где $g_1, g_2, g_3, g_4, g_T, k_1$ и k_2 – экспериментально определяемые материальные параметры.

Для определения модулей кинематического (анизотропного) упрочнения параметров g_1, g_2, g_3 в (9), (10) необходимо проведение базового эксперимента по программе жесткого нагружения на квазистатическое растяжение-сжатие с контролем пластической деформации при нагружении с обратным знаком (рис. 1, где величина Δ – заданный допуск на остаточную деформацию при определении условных пределов текучести).

По результатам эксперимента получаем зависимости $\sigma_{11}(e_{11}^p), C_p(e_{11}^p)$ и $\rho_{11}(e_{11}^p)$, из которых определяются модули анизотропного упрочнения $g_1 = d\rho_{11}/de_{11}^p$ при $e_{11}^p = 0$, $g_3 = d\rho_{11}/de_{11}^p$ при больших значениях e_{11}^p (из условия наилучшей аппрок-

симуляции кривой $\rho_{11}(e_{11}^p)$ билинейной зависимостью – точка А на рис. 2) и g_2 [11] (см. рис. 2).

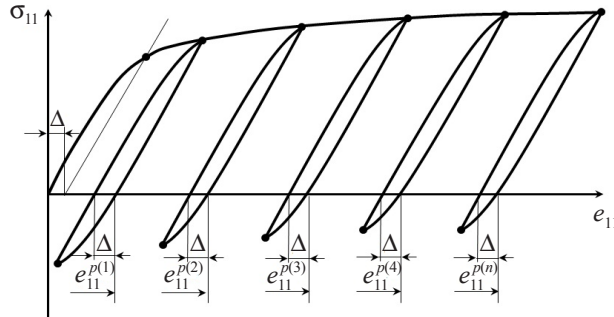


Рис. 1

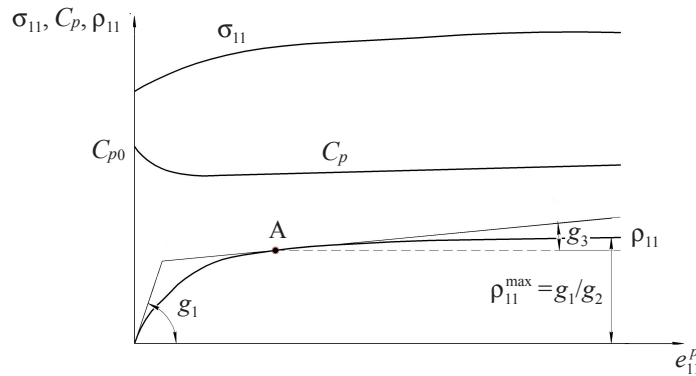


Рис. 2

Параметр g_4 определяется из эксперимента на жесткое несимметричное циклическое растяжение-сжатие лабораторного образца и находится путем сравнения экспериментальных данных стремления петли гистерезиса к установившемуся состоянию («посадка» петли) в координатах $\sigma_{11}^{(m)} \sim N$ и результатов численного моделирования аналогичных режимов нагружения при различных значениях g_4 .

Для определения материальных параметров k_1 и k_2 необходимо реализовать программу жесткого монотонного нагружения лабораторного образца до определенного значения $e_{11}^{p(1)}$, разгрузки до значения напряжений σ_{11} , при котором $\rho_{11} \cong 0$, а затем провести базовый эксперимент по определению параметров g_1 и g_2 . Для определения параметров g_1 и g_2 при $e_{11}^{p(2)}$ необходимо использовать исходный (недеформированный) лабораторный образец. Максимальное значение $e_{11}^{p(m)}$ не должно превышать значения, при котором проявляется влияние поврежденности на физико-механические свойства материала.

По результатам испытаний находятся закономерности изменения параметров g_1 и g_2 от длины пути пластического деформирования. Материальные параметры k_1 и k_2 определяются с использованием уравнения (10) из сравнения экспериментальных данных и численного моделирования аналогичных режимов нагружения при различных значениях k_1 и k_2 .

При несимметричном жестком и мягком циклических нагружениях за счет члена $\dot{\rho}_{ij}^*$ уравнение (9) описывает процессы посадки петли циклического пластического гистерезиса. При $g_T = g_3 = g_4 = k_1 = 0$ из (9) получаем частный случай уравне-

ния (9) – уравнение Армстронга – Фредерика – Кадашевича

$$\dot{\rho}_{ij} = g_1 \dot{e}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \dot{\chi}. \quad (12)$$

Для описания эволюции поверхности «памяти» необходимо сформулировать уравнение для ρ_{\max} :

$$\dot{\rho}_{\max} = \frac{(\rho_{ij} \dot{\rho}_{ij}) H(F_\rho)}{(\rho_{ij} \rho_{ij})^{1/2}} - g_2 \rho_{\max} \dot{\chi} - g_T \rho_{\max} \langle \dot{T} \rangle. \quad (13)$$

Компоненты тензора скоростей пластических деформаций подчиняются закону градиентальности вектора скорости пластических деформаций к поверхности текучести в точке нагружения:

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda S_{ij}, \quad (14)$$

где λ – коэффициент пропорциональности, определяемый из условия прохождения новой поверхности текучести через конец вектора девиатора напряжений в конце этапа нагружения.

На стадии развития рассеянных по объему повреждений наблюдается влияние поврежденности на физико-механические характеристики материала. Это влияние может быть учтено введением эффективных напряжений [19]:

$$\tilde{\sigma}'_{ij} = F_1(\omega) \sigma'_{ij} = \frac{G}{\tilde{G}} \sigma'_{ij} = \frac{\sigma'_{ij}}{(1-\omega)[1 - ((6K+12G)/(9K+8G))\omega]}, \quad (15)$$

$$\tilde{\sigma} = F_2(\omega) \sigma = \frac{K}{\tilde{K}} \sigma = \frac{\sigma}{4G(1-\omega)/(4G+3K\omega)}, \quad (16)$$

где \tilde{G}, \tilde{K} – эффективные модули упругости, определяемые по формулам Мак-Кензи [22].

Аналогично определяется эффективная переменная $\tilde{\rho}_{ij}$:

$$\tilde{\rho}_{ij} = F_1(\omega) \rho_{ij}. \quad (17)$$

Эволюционные уравнения накопления усталостных повреждений

Постулируется, что скорость процесса накопления повреждений при малоцикло-вой усталости (МЦУ) определяется эволюционным уравнением вида [11, 15, 16, 19]:

$$\dot{\omega} = f_1(\beta) f_2(\omega) f_3(W) f_4(\dot{W}), \quad (18)$$

где функции $f_i, i = \overline{1, 4}$, учитывают: $f_1(\beta)$ – объемность напряженного состояния; $f_2(\omega)$ – уровень накопленной поврежденности; $f_3(W)$ – накопленную относительную энергию повреждения, затраченную на образование дефектов; $f_4(\dot{W})$ – скорость изменения энергии повреждения.

В уравнении (18):

$$f_1(\beta) = e^\beta, \quad f_2(\omega) = \begin{cases} 0, & W \leq W_a, \\ \omega^{1/3} (1-\omega)^{2/3}, & W > W_a \wedge \omega \leq 1/3, \\ \sqrt[3]{16/9} \omega^{-1/3} (1-\omega)^{-2/3}, & W > W_a \wedge \omega > 1/3, \end{cases} \quad (19)$$

$$f_3(W) = \frac{W - W_a}{W_f}, \quad f_4(\dot{W}) = \frac{\dot{W}}{W_f}, \quad (20)$$

где $\beta = \sigma/\sigma_n$ – параметр объемности напряженного состояния, W_a – значение энергии

гии повреждения в конце стадии зарождения рассеянных повреждений при МЦУ, а W_f – значение энергии, соответствующее образованию макроскопической трещины.

Длительность фазы зарождения микродефектов будем связывать со значением параметра W_a .

Когда микродефекты вырастают до размеров, сопоставимых со средним расстоянием между ними, начинается процесс слияния (разрыв оставшихся промежутков сплошности между дефектами). В настоящей статье детальная модель слияния полостей не строилась, а для учета этого процесса кинетическое уравнение (за счет члена $f_2(\omega)$) сформулировано таким образом, чтобы при достижении поврежденностью значения $\omega = 1/3$ зависимость $\dot{\omega} = f_2(\beta)$ учитывала лавинообразное нарастание величины поврежденности.

Критерий прочности поврежденного материала

В качестве критерия окончания фазы развития рассеянных микроповреждений принимается условие достижения величиной поврежденности ω своего критического значения:

$$\omega = \omega_f \leq 1. \quad (21)$$

2. Численные результаты

В лаборатории испытаний физико-механических свойств конструкционных материалов Научно-исследовательского института механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского выполнены экспериментальные исследования образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т в условиях жесткого одноосного растяжения-сжатия при комнатной температуре. Программа испытаний состоит из пяти блоков, включающих в себя монотонные и циклические нагружения [21]:

- в первом блоке реализуется 20 циклов симметричного жесткого циклического нагружения с амплитудой деформации $e_{11} = 0,0008$;
- во втором блоке происходит монотонное растяжение до деформации $e_{11} = 0,05$;
- в третьем блоке реализуется 200 циклов несимметричного циклического нагружения с размахом деформаций $\Delta e_{11} = e_{11}^{(+)} - e_{11}^{(-)} = 0,012$ и средней деформацией $e_{11}^{(m)} = 0,044$ (в этом блоке происходит посадка петли пластического гистерезиса);
- в четвертом блоке реализуется монотонное растяжение до деформации $e_{11} = 0,01$;
- в пятом блоке происходит несимметричное циклическое нагружение с размахом деформаций $\Delta e_{11} = e_{11}^{(+)} - e_{11}^{(-)} = 0,012$ и средней деформацией $e_{11}^{(m)} = 0,094$ вплоть до разрушения (число циклов до разрушения $N_f = 2800$). В этом блоке нагружения также происходит посадка петли пластического гистерезиса.

В таблицах 1–3 для стали 12Х18Н10Т представлены основные физико-механические характеристики и материальные параметры модели МПС, определенные по результатам базового эксперимента [11, 12, 19] и используемые в расчетах.

Таблица 1

Физико-механические характеристики и параметры модели МПС

K , МПа	G , МПа	C_p^o , МПа	g_1 , МПа	g_2	g_3 , МПа	g_4	k_1	k_2	a
165277	76282	203	20850	297	660	3	0,48	0,2	5

Таблица 2

Модуль циклического упрочнения Q_s

Q_s , МПа	203	210	232	232	232	232	232
ρ_{max} , МПа	0	30	60	90	100	110	120

Таблица 3

Модуль монотонного упрочнения q_χ

q_χ , МПа	-17000	-4634	-811	371	737	849	897	900	900	900	900	900	
χ	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05	0,09	0,15

На рис. 3 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных в первом блоке симметричного нагружения. Здесь и далее маркерами отмечены опытные данные, а сплошными линиями – результаты расчета.

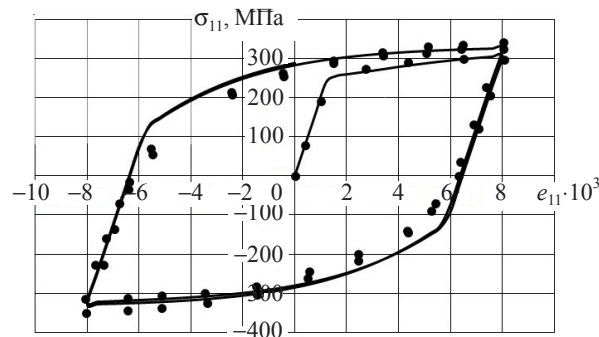


Рис. 3

На рис. 4 показан 20-й цикл симметричного нагружения, затем монотонное растяжение до деформации $e_{11} = 0,05$ и первый цикл несимметричного нагружения.

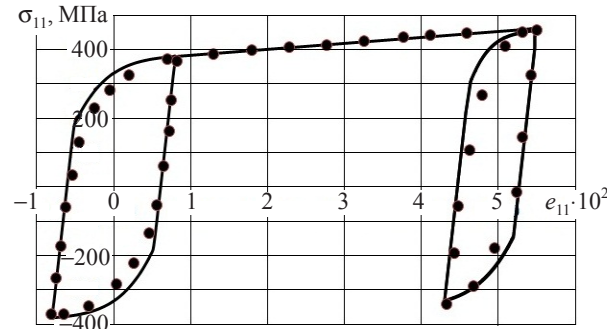


Рис. 4

На рис. 5 представлена диаграмма циклического гистерезиса в конце третьего (200-й цикл) и начале пятого (1-й цикл) блоков нагружения.

На рис. 6, 7 приведены результаты, иллюстрирующие процессы посадки петли пластического гистерезиса соответственно в третьем и пятом блоках несимметричного циклического нагружения соответственно. Видно хорошее качественное и количественное согласование опытных и расчетных данных.

В следующем примере представлены результаты экспериментальных исследований образцов из нержавеющей стали 12Х18Н9 при жестком нестационарном несимметричном циклическом нагружении, состоящем из двух блоков:

– в первом блоке образец сжимается до деформации $e_{11} = 0,01$, а затем растягивается до деформации $e_{11} = 0,05$;

– во втором блоке реализуется несимметричное жесткое циклическое нагружение с размахом деформаций $\Delta e_{11} = e_{11}^{(+)} - e_{11}^{(-)} = 0,01$ вплоть до разрушения ($N_f = 850$). Здесь осуществляется посадка петли пластического гистерезиса (рис. 8) и после 500-го цикла нагружения петля становится практически симметричной.

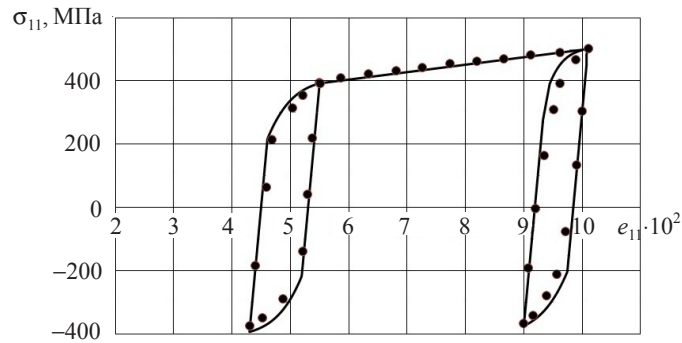


Рис. 5

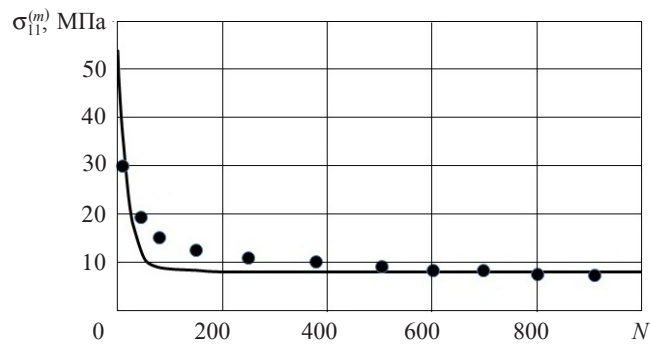


Рис. 6

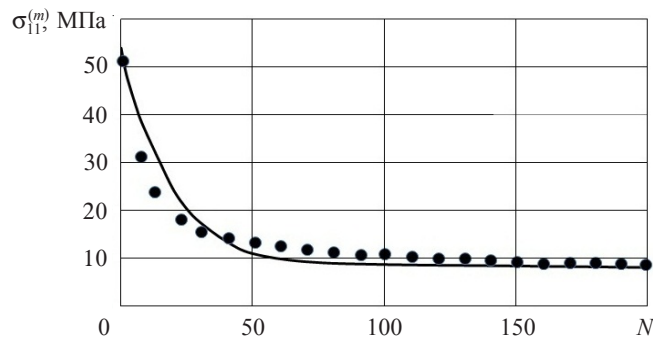


Рис. 7

В таблицах 4–6 для стали 12X18H9 представлены основные физико-механические характеристики и материальные параметры модели МПС, определенные по результатам базового эксперимента [11, 12] и используемые в расчетах.

Таблица 4

Физико-механические характеристики и параметры модели МПС

K , МПа	G , МПа	C_p^o , МПа	g_1 , МПа	g_2	g_3 , МПа	g_4	k_1	k_2	a	W_a	W_f , МДж/м ³
165277	76282	190	24090	286	800	2	0,415	0,2	5	0	800

Таблица 5

Модуль циклического упрочнения Q_s

Q_s , МПа	190	205	210	215	220	225	225
ρ_{max} , МПа	0	20	40	60	80	100	120

Таблица 6

Модуль монотонного упрочнения q_χ

q_χ , МПа	-5000	-4471	-4188	-3859	-2460	-182	888	1531	1274	913	913	913
χ	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06

На рис. 8 показан процесс деформирования стали 12Х18Н9 во втором блоке нагружения (500-й цикл). Также видно хорошее качественное и количественное согласование опытных и расчетных данных.

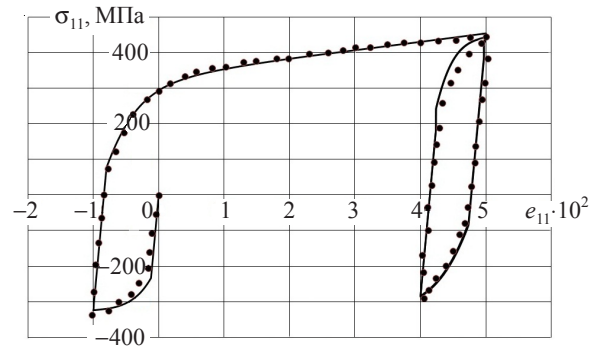


Рис. 8

На рис. 9 приведено изменение среднего напряжения цикла $\sigma_{11}^{(m)}$ в процессе циклического нагружения во втором блоке.

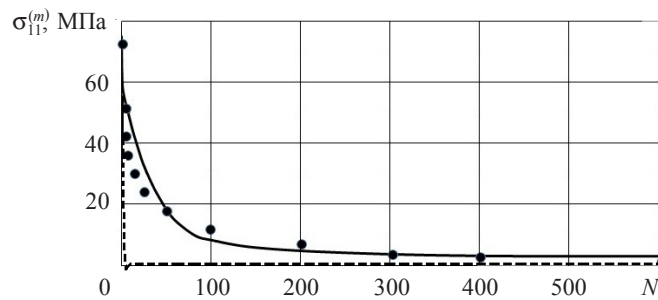


Рис. 9

Видно, что частный случай модели термопластичности Ю.Г. Коротких с использованием определяющего соотношения для ρ_{ij} в форме (12) осуществляет посадку петли циклического гистерезиса сразу же на первом цикле нагружения (штриховая кривая на рис. 9), то есть этот вариант определяющих соотношений пластичности не может описать процесс посадки петли циклического гистерезиса.

Модифицированная модель Ю.Г. Коротких с использованием определяющего соотношения для ρ_{ij} в форме (9) качественно и количественно описывает процесс посадки.

На рис. 10 приведена усталостная кривая нержавеющей стали 12Х18Н9 при жестком симметричном циклическом нагружении. Здесь сплошной кривой показана экспериментальная кривая, а маркерами – результаты расчетов с использованием различных определяющих соотношений МПС: треугольными маркерами отмечены расчетные данные по модели В.С. Бондаря [21], круглыми маркерами – по модели МПС с использованием модифицированной модели термопластичности Ю.Г. Коротких (определяющее соотношение для ρ_{ij} в форме (9)), а квадратными маркерами – по модели термопластичности Ю.Г. Коротких с использованием соотношения для ρ_{ij} в форме (12). Видно, что в области малых долговечностей расчеты по всем моделям практически совпадают. В области больших долговечностей расчеты по модели В.С. Бондаря дают завышенные уровни долговечности.

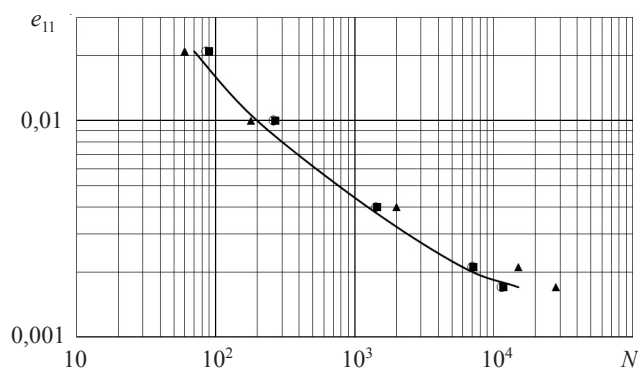


Рис. 10

В целом сопоставление результатов расчетов и экспериментов показывает, что развитая модель МПС качественно и с необходимой для практических расчетов точностью количественно описывает процессы усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при блочном несимметричном малоцикловом нагружении.

Заключение

Для описания эффекта посадки петли циклического пластического гистерезиса при жестком (по деформациям) нестационарном несимметричном циклическом нагружении выполнена модификация модели термопластичности Ю.Г. Коротких, заключающаяся в использовании другой формулировки эволюционных уравнений для смещения центра поверхности текучести (тензора микронапряжений). Путем сопоставления результатов численного моделирования процессов с опытными данными показано, что модифицированная модель термопластичности Ю.Г. Коротких описывает процесс посадки петли циклического гистерезиса.

Для описания усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при блочном несимметричном малоцикловом нагружении проведена оценка достоверности определяющих соотношений МПС путем сопоставления результатов численных экспериментов с опытными данными по пластическому деформированию и накоплению повреждений в нержавеющей стали (12Х18Н10Т,

12X18H9) при блочном нестационарном несимметричном малоцикловом нагружении, которая подтвердила правильность моделирования и определения материальных параметров.

Учитывая тот факт, что оценки усталостной долговечности с использованием модели пластичности Ю.Г. Коротких и его модифицированной модели при жестком несимметричном нестационарном малоцикловом нагружении приводят практически к одному и тому же результату (см. рис. 8), для решения данного класса прикладных задач можно рекомендовать использование более простого соотношения для ρ_{ij} в форме (12).

Список литературы

1. Митенков Ф.М., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г., Панов В.А., Пичков С.Н. *Методы обоснования ресурса ЯЭУ*. М.: Машиностроение, 2007. 445 с.
2. Лэмба Г.С., Сайдботтом О.М. Пластичность при циклическом деформировании по непропорциональным траекториям. Ч. I. Эксперименты с циклическим упрочнением, приспособляемостью и последующим деформационным упрочнением. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1978. Т. 100. №1. С. 108–117.
3. Макдауэлл Д.Л. Экспериментальное изучение структуры определяющих уравнений для непропорциональной циклической пластичности. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1985. Т. 107. №4. С. 98–111.
4. Охаси И., Каваи М., Каито Т. Неупругое поведение стали 316 при многоосных непропорциональных циклических нагружениях при повышенной температуре. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1985. Т. 107. № 2. С. 6–15.
5. Tanaka E., Murakami S., Ooka M. Effects of plastic strain amplitudes on non-proportional cyclic plasticity. *Acta Mechanica*. 1985. Vol. 57. P. 167–182.
6. Tanaka E., Murakami S., Ooka M. Effects of strain path shapes on non-proportional cyclic plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1985. Vol. 33. No 6. P. 559–575.
7. Hassan T., Taleb L., Krishna S. Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models. *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. P. 1863–1889.
8. Huang Z.Y., Chaboche J.L., Wang Q.Y., Wagner D., Bathias C. Effect of dynamic strain aging on isotropic hardening in low cycle fatigue for carbon manganese steel. *Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 589. P. 34–40.
9. Jiang Y., Zhang J. Benchmark experiments and characteristic cyclic plasticity deformation. *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. P. 1481–1515.
10. Taleb L., Cailletaud G., Sa'i K. Experimental and numerical analysis about the cyclic behavior of the 304L and 316L stainless steels at 350 °C. *International Journal of Plasticity*. 2014. Vol. 61. P. 32–48.
11. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
12. Митенков Ф.М., Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. и др. *Прикладная теория пластичности*. М.: Физматлит, 2015. 284 с.
13. Бондарь В.С., Даншин В.В. *Пластичность. Пропорциональные и непропорциональные нагружения*. М.: Физматлит, 2008. 176 с.
14. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*. 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302.
15. Боднер С.Р., Линдхолм У.С. Критерий приращения повреждения для зависящего от времени разрушения материалов. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1976. Т. 100. №2. С. 51–58.

16. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1985. Т. 107. №1. С. 90–98.
17. Коллинз Дж. *Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение*. М.: Мир, 1984. 624 с.
18. Мураками С. Сущность механики поврежденной среды и ее приложение к теории анизотропных повреждений при ползучести. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1983. №2. С. 44–50.
19. Волков И.А., Игумнов Л.А. *Введение в континуальную механику поврежденной среды*. М.: Физматлит, 2017. 304 с.
20. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Петров В.К. Сравнительный анализ вариантов теорий пластичности при циклических нагружениях. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2017. №2. С. 23–44.
21. Коротких Ю. Г. Описание процессов накопления повреждений материала при неизотермическом вязкопластическом деформировании. *Проблемы прочности*. 1985. №1. С. 18–23.
22. Mackenzie J.K. The elastic constants of a solid containing spherical holes. *Proceedings of the Physical Society*. 1950. Vol. 63. №2. P. 2–11.

References

1. Mitenkov F.M., Kaydalov V.B., Korotkikh Yu.G., Panov V.A., Pichkov S.N. *Metody obosnovaniya resursa yadernykh energeticheskikh ustanovok [Methods of Substantiation of the Resource of Nuclear Power Plants]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 2007. 448 p. (In Russian).
2. Lamba H.S., Sidebottom O.M. Cyclic plasticity for nonproportional paths: Part 1. Cyclic hardening, erasure of memory, and subsequent strain hardening experiments. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1978. Vol. 100. No 1. P. 96–103. DOI:10.1115/1.3443456.
3. McDowell D.L. An experimental study of the structure of constitutive equations for nonproportional cyclic plasticity. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1985. Vol. 107. No 4. P. 307–315. DOI:10.1115/1.3225824.
4. Ohashi Y., Kawai M., Kaito T. Inelastic behavior of type 316 stainless steel under multiaxial nonproportional cyclic stressings at elevated temperature. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1985. Vol. 107. No 2. P. 101–109. DOI: 10.1115/1.3225781.
5. Tanaka E., Murakami S., Ooka M. Effects of plastic strain amplitudes on non-proportional cyclic plasticity. *Acta Mechanica*. 1985. Vol. 57. P. 167–182.
6. Tanaka E., Murakami S., Ooka M. Effects of strain path shapes on non-proportional cyclic plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1985. Vol. 33. No 6. P. 559–575.
7. Hassan T., Taleb L., Krishna S. Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models. *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. P. 1863–1889.
8. Huang Z.Y., Chaboche J.L., Wang Q.Y., Wagner D., Bathias C. Effect of dynamic strain aging on isotropic hardening in low cycle fatigue for carbon manganese steel. *Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 589. P. 34–40.
9. Jiang Y., Zhang J. Benchmark experiments and characteristic cyclic plasticity deformation. *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. P. 1481–1515.
10. Taleb L., Cailletaud G., Sa'i K. Experimental and numerical analysis about the cyclic behavior of the 304L and 316L stainless steels at 350 °C. *International Journal of Plasticity*. 2014. Vol. 61. P. 32–48.
11. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami [Equations of State Viscoelasticoplastic Environments with Injuries]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).
12. Mitenkov F.M., Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G. et al. *Prikladnaya teoriya plastichnosti [Applied Theory of Plasticity]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2015. 284 p. (In Russian).
13. Bondar V.S., Danshin V.V. *Plastichnost. Proportionalnye i neproportionalnye nagruzheniya [Plasticity. Proportional and Non-proportional Loading]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 176 p. (In Russian).

14. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*. 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302.
15. Bodner S.R., Lindholm U.S. An incremental criterion for time-dependent failure of materials. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1976. Vol. 98. No 2. P. 140–145. DOI: 10.1115/1.3443356.
16. Lemaitre J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1985. Vol. 107. No 1. P. 83–89. DOI: 10.1115/1.3225775.
17. Callings J.A. *State Equation for Viscoelasticoplastic Media with Injuies*. NY–Chichester – Brisbane–Toronto–Singapore. 1981. 624 p.
18. Murakami S. Notion of continuum damage mechanics and its application to anisotropic creep damage theory. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME*. Vol. 105. Iss. 2. P. 99–105.
19. Volkov I.A., Igumnov L.A. *Vvedenie v kontinualnuyu mekhaniku povrezhdennoy sredy [Introduction to Continuum Mechanics Damaged Environment]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2017. 304 p. (In Russian).
20. Bondar V.S., Abashev D.R., Petrov V.K. Sravnitelnyy analiz variantov teorii plastichnosti pri tsiklicheskikh nagruzheniyakh [Comparative analysis of variants of plasticity theories under cyclic loading]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2017. No 2. P. 23–44 (In Russian).
21. Korotkikh Yu.G. A description of the processes of accumulation of damages of a material in nonisothermal viscoplastic deformation. *Strength of Materials*. 1985. No 1. P. 21–26.
22. Mackenzie J.K. The elastic constants of a solid containing spherical holes. *Proceedings of the Physical Society*. 1950. Vol. 63. №2. P. 2–11.

MODELING FATIGUE LIFE OF POLYCRYSTALLINE STRUCTURAL ALLOYS UNDER BLOCK-TYPE NONSYMMETRICAL LOW-CYCLE LOADING

Volkov I.A.^{1,2}, Igumnov L.A.², Tarasov I.S.¹, Shishulin D.N.³, Markova M.T.¹

¹*Volga State University of Water Transport, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

²*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

³*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

Processes of plastic deformation and damage accumulation in polycrystalline structural alloys under block-type nonstationary nonsymmetrical cyclic loading are considered. From the viewpoint of mechanics of damaged media, a mathematical model is developed, which describes processes of elastoplastic deformation and damage accumulation under low-cycle loading. The model of damaged medium mechanics consists of three interconnected parts: relations defining elastoplastic behavior of materials, accounting for the effect of the failure process; equations describing damage accumulation kinetics; strength criteria of the damaged material.

A modified Korotkikh model is used as defining relations of plasticity. The modification of the model consists in using another formulation of evolutionary equations for the displacement of the yield surface center (micro-stress tensor) in describing the effect of placing the plastic hysteresis loop in the conditions of hard nonstationary cyclic loading.

A version of kinetic equations of damage accumulation is introduced, based on using a scalar parameter of damage degree, based on the energy principles and accounting for the main effects of nucleation, growth and merging of microdefects under random complex modes of low-cycle loading. To assess the reliability the scope of applicability of the defining relations of mechanics of damaged media, the processes of plastic deformation and damage accumulation in a number of structural steels in low-cycle tests have been numerically analyzed, and the numerical results obtained have

been compared against the data of full-scale experiments. It is shown that the presented model of mechanics of damaged media adequately describes, both qualitatively and, accurately enough for practical engineering purposes, quantitatively, the main effects of the processes of plastic deformation and damage accumulation in structural alloys under block-type nonstationary nonsymmetrical low-cycle loading.

Keywords: low-cycle fatigue, plastic deformation, damage degree, block-type nonsymmetrical loading, mechanics of damaged media, modeling, numerical and full-scale experiments.