

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-1-111-128

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ*

© 2021 г.

Шишулин Д.Н., Боев Е.В.

*Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*
e.boev87@mail.ru

Поступила в редакцию 29.10.2020

Рассматриваются процессы усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости. С позиции механики поврежденной среды развита математическая модель, описывающая процессы пластического деформирования и накопления усталостных повреждений. Модель механики поврежденной среды состоит из трех взаимосвязанных частей: соотношений, определяющих циклическое упругопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения; уравнений, описывающих кинетику накопления усталостных повреждений; критерия прочности поврежденного материала.

Вариант определяющих соотношений упругопластичности основан на представлении о поверхности микропластического нагружения в форме Мизеса и принципе градиентальности вектора скорости пластических деформаций к поверхности в точке нагружения. Такой вариант уравнений состояния отражает основные эффекты процесса циклического пластического деформирования материала для произвольных сложных траекторий нагружения.

Вариант кинетических уравнений накопления усталостных повреждений основан на введении скалярного параметра поврежденности, базируется на энергетических принципах и учитывает основные эффекты образования, роста и слияния микродефектов при произвольных сложных режимах нагружения. Предложена единая форма эволюционного уравнения накопления усталостных повреждений для малоциклового и многоциклового усталости. В качестве критерия прочности поврежденного материала используется условие достижения величиной поврежденности критического значения.

Для оценки достоверности и определения границ применимости определяющих соотношений механики поврежденной среды проведены численные исследования процессов накопления усталостных повреждений по циклическому неупругому деформированию и усталостному разрушению стали 20 и стали 08X18H12T при одночастотном нагружении с высокой частотой и двух-

* Выполнено при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект 0729-2020-0054).

частотном нагружении с различными амплитудами. Проведено сравнение полученных численных результатов с данными натурных экспериментов, которое показало, что разработанная модель поврежденной среды достоверно описывает долговечность конструкций при действии механизмов мало- и многоциклового усталости.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, многоцикловая усталость, деформация, напряжение, поврежденность, моделирование, механика поврежденной среды, двухчастотное нагружение, численный и натурный эксперименты.

Введение

Многочисленные экспериментальные исследования усталостных повреждений позволили сделать вывод, что усталость происходит как минимум в двух отличающихся друг от друга областях циклического нагружения – малоциклового усталости (МЦУ) и многоциклового усталости (МнЦУ).

Малоцикловая усталость характеризуется образованием в процессе циклического нагружения макроскопических пластических деформаций в цикле нагружения. Условно область МЦУ ограничивают числом циклов до разрушения, не превышающим 10^4 в экспериментах на одноосное растяжение-сжатие лабораторных образцов. Этот деградационный механизм характерен для зон с конструктивными концентраторами напряжений, такими как корень сварного шва, переходы с малыми радиусами скругления и т.п. с номинальными напряжениями порядка $(0,5-0,8)\sigma_T$, где σ_T – предел текучести материала. Для МЦУ характерны проявления эффектов упрочнения и разупрочнения материала, вызванные изменениями микроструктуры и фазового состава. Кинетика образования и роста микродефектов и долговечность при МЦУ в значительной степени определяется характеристиками процесса упруго-пластического деформирования конструкционных материалов и историей их нагружения [1–9]. Многоцикловая усталость характеризуется образованием в процессе циклического нагружения микроскопических неупругих деформаций в цикле нагружения. Условно область МнЦУ ограничивают числом циклов до разрушения от 10^5 до 10^7 при одноосном растяжении-сжатии лабораторных образцов.

В области долговечностей от 10^4 до 10^5 циклов нагружения реализуется совместное действие обоих механизмов усталостной деградации материала.

Многоцикловая усталость металла является следствием микроскопической деформации, вызывающей совокупность необратимых процессов на микро- и мезо-уровнях (циклическая вязкость, внутреннее трение и так далее) [3]. В публикациях [8–12] с современных позиций механики поврежденной среды (МПС) развита математическая модель [3, 13–16], описывающая процессы накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при многоосных непропорциональных путях малоциклового термосилового нагружения. В [17] приведен энергетический критерий МнЦУ и основные экспериментальные результаты его обоснования.

На практике значение имеют случаи совместного действия повторно-статических нагрузок с низкой частотой нагружения и высокочастотных циклических нагрузок, оказывающих существенное взаимное влияние на соответствующие характеристики материала при раздельном приложении этих нагрузок (двухчастотное нагружение). Известно большое количество работ, посвященных исследованию со-

противления усталости при двухчастотном нагружении, в которых предлагаются различные аналитические зависимости для оценки долговечности материалов в указанных условиях нагружения [4–7].

В настоящее время не существует единого научно обоснованного подхода к оценке долговечности при двухчастотном нагружении, базирующегося на экспериментально установленных физических закономерностях, отражающих связь между параметрами нагружения и сопротивления усталости в широком диапазоне изменений амплитудных и частотных отношений.

В большинстве публикаций методики долговечности при двухчастотном нагружении основаны на линейной интерпретации накопления усталостных повреждений при совмещении разночастотных нагрузок. Однако обработка многочисленных результатов испытаний материалов при двухчастотном нагружении свидетельствует об ограниченной применимости гипотезы линейного суммирования повреждений для такого вида нагружения. Систематизированные экспериментальные данные, характеризующие закономерности циклического деформирования при двухчастотном нагружении, свидетельствуют о снижении циклических пределов упругости и пределов выносливости по сравнению с одночастотным нагружением [18].

Один из подходов, позволяющих устранить этот недостаток, базируется на изучении неупругих циклических деформаций как при отдельном, так и при двухчастотном нагружении. Это особенно важно, поскольку в ряде публикаций однозначно была показана взаимосвязь процессов неупругого деформирования и усталостного повреждения металлов [6]. Однако экспериментальному изучению закономерностей циклического пластического деформирования материалов при двухчастотном нагружении посвящены лишь отдельные статьи [7, 8].

В настоящей статье модель МПС обобщается на случай совместного протекания процессов мало- и многоциклового усталости металлов, проводится оценка достоверности модели МПС путем численного моделирования экспериментальных процессов и сравнение полученных численных результатов с опытными данными [11].

1. Определяющие соотношения механики поврежденной среды

Модель поврежденной среды, развитая в [10–12], состоит из трех взаимосвязанных составных частей:

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

Определяющие соотношения пластичности

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

$$\begin{aligned}\sigma &= 3K[e - \alpha(T - T_0)], \\ \sigma_{ij} &= 2Ge_{ij}^{te}, \\ \dot{\sigma} &= 3K(\dot{e} - \dot{\alpha}T - \alpha\dot{T}) + \frac{\dot{K}}{K}\sigma,\end{aligned}\tag{1}$$

$$\dot{\sigma}'_{ij} = 2G\dot{e}'_{ij} + \frac{\dot{G}}{G}\sigma'_{ij},$$

где T – температура, T_0 – начальная температура, $K(T)$ – модуль объемного сжатия, $G(T)$ – модуль сдвига, $\alpha(T)$ – коэффициент линейного температурного расширения материала, σ, e – гидростатические составляющие тензоров напряжений и деформаций, e'_{ij} – девиатор тензора упругих деформаций, σ'_{ij} – тензор напряжений.

Для описания эффектов монотонного и циклического макро- и микропластического деформирования при МЦУ и МнЦУ вводится поверхность пластического нагружения в форме Мизеса (ρ_{ij} – тензор микронапряжений, C_m – радиус поверхности микропластического нагружения):

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

Для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве деформаций вводится поверхность «памяти». Уравнение поверхности «памяти» имеет вид:

$$a_e = (e_{ij}^p - \xi_{ij})(e_{ij}^p - \xi_{ij}) - a_{e\max}^2 = 0, \quad (3)$$

где $a_{e\max}$ – максимальное значение интенсивности тензора пластических деформаций e_{ij}^p в процессе нагружения, ξ_{ij} – тензор односторонне накопленных пластических деформаций.

При численном моделировании кинетики напряженно-деформированного состояния при пластическом деформировании необходимо максимально точно описывать процессы упрочнения и разупрочнения конструкционных материалов, так как эти механизмы играют определяющую роль в точности оценок ресурсных характеристик. При усталости серьезную роль играет конкуренция процессов упрочнения и разупрочнения, вызванных в материале механизмами изменения фазового состава, микроструктурного состояния, изменением плотности дислокаций, а также изменением температуры.

В диапазоне температур T , в котором можно пренебречь эффектами отжига, принимается, что изотропное упрочнение/разупрочнение (эволюция C_m) запишется как:

$$\dot{C}_m = q_\chi \dot{\chi}_{mon} + a_c (Q_{s\chi} - C_m) \dot{\chi}_{cyc} + a_\xi (Q_{s\xi} - C_m) \dot{\chi}_\xi + q_T \dot{T}, \quad (4)$$

$$C_m = C_m^0 + \int_0^t \dot{C}_m dt, \quad (5)$$

$$\dot{\chi} = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \right)^{1/2}, \quad (6)$$

$$\chi = \int_0^t \dot{\chi} dt, \quad \xi = \left(\frac{2}{3} \xi_{ij} \xi_{ij} \right)^{1/2}, \quad \xi = \int_0^t \dot{\xi} dt,$$

$$\dot{\chi}_{mon} = \begin{cases} 0 & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0, \\ \dot{\chi} & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0, \end{cases} \quad \dot{\chi}_{cyc} = \begin{cases} \dot{\chi} & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0, \\ 0 & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$q_\chi = q_2 A - (1 - A) q_1, \quad Q_{s\chi} = Q_{2\chi} A + (1 - A) Q_{1\chi}, \quad Q_{s\xi} = Q_{2\xi} A + (1 - A) Q_{1\xi}, \quad (8)$$

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

Здесь C_m^0 – начальный радиус поверхности микропластического нагружения; q_1, q_2, q_T – модули монотонного изотропного упрочнения, соответствующие монотонным лучевым путям нагружения, излому траектории деформирования на 90° и температурному изменению радиуса поверхности текучести; $Q_{1\chi}, Q_{2\chi}, Q_{1\xi}, Q_{2\xi}$ – модули циклического изотропного упрочнения/разупрочнения, соответствующие пропорциональному нагружению и излому траектории на 90° ; a_c и a_ξ – постоянные, определяющие скорость процесса стабилизации формы петли гистерезиса циклического деформирования материала; $Q_{s\chi}, Q_{s\xi}$ – стационарные значения радиуса поверхности текучести при данных $a_{e\max}, \xi$ и температуре T ; $\dot{\chi}_{mon}$ – приращение длины траектории пластического деформирования материала на монотонных участках; $\dot{\chi}_{cyc}$ – приращение длины траектории пластического деформирования материала на участках стабилизированного циклического деформирования без смещения центра поверхности a_e ; $\dot{\chi}_\xi$ – приращение длины траектории пластического деформирования материала на участках циклического деформирования со смещением центра поверхности a_e .

Первый член уравнения (4) описывает изотропное упрочнение в результате монотонного пластического деформирования, второй член – циклическое упрочнение/разупрочнение материала на стабилизированных участках циклического деформирования, третий член – циклическое разупрочнение материала при нестабилизированном циклическом деформировании, четвертый – изменение радиуса поверхности текучести при изменении температуры. Уравнение (4) описывает локальную анизотропию пластического упрочнения в зависимости от параметра A , характеризующего отклонение вектора догрузки от нормали к поверхности текучести в точке нагружения. Эволюция тензора микронапряжений ρ_{ij} принимается в виде:

$$\dot{\rho}_{ij} = \dot{\rho}_{ij}^m + \dot{\rho}_{ij}^p + \dot{\rho}_{ij}^r, \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad (9)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^m = f(\chi) [g_1^m \dot{e}_{ij}^p - g_2^m \rho_{ij}^m \dot{\chi}] + g_T^m \rho_{ij}^m \langle \dot{T} \rangle, \quad (10)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^p = f(\chi) [g_1^p \dot{e}_{ij}^p - g_2^p \rho_{ij}^p \dot{\chi}] + g_T^p \rho_{ij}^p \langle \dot{T} \rangle, \quad (11)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^r = f(\chi) \left[g_1^r \dot{e}_{ij}^r - g_2^r \left(\frac{\rho_{\min}^r - \rho_u^r}{\rho_u^r} \right) \rho_{ij}^r \dot{\chi} \langle \cos \gamma \rangle \right] + g_T^r \rho_{ij}^r \langle \dot{T} \rangle, \quad (12)$$

$$\cos \gamma = \frac{\dot{\rho}_{ij}^r \rho_{ij}^r}{(\dot{\rho}_{ij}^r \dot{\rho}_{ij}^r)^{1/2} (\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r)^{1/2}}, \quad \rho_u^r = (\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r)^{1/2}, \quad (13)$$

$$g_T^{m,p,r} = \frac{1}{g_1^{m,p,r}} \left[\frac{\partial g_1^{m,p,r}}{\partial T} \right], \quad (14)$$

$$f(\chi) = f(\chi_m) + f(\chi_c), \quad (15)$$

$$f(\chi_m) = 1 + k_1^{mon} (1 - \exp(-k_1^{mon} \chi_m)), \quad f(\chi_c) = 1 + k_1^{cyc} (1 - \exp(-k_2^{cyc} \chi_c)), \quad (16)$$

где $g_1^{m,p,r}, g_2^{m,p,r}, k_1^{mon,cyc}, k_2^{mon,cyc}$ – экспериментально определяемые материальные параметры.

В формуле (9) первый член описывает эволюцию тензора ρ_{ij} , связанного с образованием и эволюцией микропластических деформаций; второй – связанного с об-

разованием макроскопических пластических деформаций; третий – при односторонне накапливаемой пластической деформации.

Зависимость (9) позволяет описывать основные эффекты анизотропии, вызванной неупругим деформированием при знакопеременном нагружении, а также эффекты, возникающие при реализации жестких («посадка») петли гистерезиса и мягких режимов нагружения («вышагивание») петли гистерезиса).

Весовой множитель $f(\chi)$ в (10), (11) и (12) позволяет описать эволюцию ρ_{ij} при зависимости параметров $g_1^{m,p,r}$, $g_2^{m,p,r}$ от длины пути пластического деформирования χ на участках монотонного и циклического деформирования.

Для величин B , заключенных в угловые скобки, выполняются условия:

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

Компоненты тензора скоростей пластических \dot{e}_{ij}^p деформаций подчиняются закону градиентальности:

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda_p S_{ij}. \quad (17)$$

Влияние накопленной поврежденности учитывается через эффективные значения гидростатической и девиаторной части тензора напряжений, которые в свою очередь определяются через эффективные значения модулей упругости [11]:

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}'_{ij} &= F_1(\omega) \sigma'_{ij} = \frac{G}{\tilde{G}} \sigma'_{ij} = \frac{\sigma'_{ij}}{(1-\omega)[1-(6K+12G)\omega/(9K+8G)]}, \\ \tilde{\sigma} &= F_2(\omega) \sigma = \frac{K}{\tilde{K}} \sigma = \frac{\sigma}{4G(1-\omega)/(4G+3K\omega)}, \\ \tilde{\rho}_{ij}^{(n)} &= F_1(\omega) \rho_{ij}^{(n)}, \quad n = m, p, r, \end{aligned} \quad (18)$$

где $F_{1,2}(\omega)$ – зависимости Мак-Кензи [11].

Эволюционные уравнения накопления усталостных повреждений при мало- и многоцикловой усталости

Уравнения накопления повреждений базируются на связи величины поврежденности с макроскопическими параметрами, которые могут быть экспериментально определены. В настоящее время наиболее физически обоснованным и апробированным является энергетический подход при определении ресурсных характеристик поликристаллических тел [19–24]. В.В. Новожиловым [19] было показано, что при малоцикловой усталости энергия, затраченная на образование дефектов при нестационарном упругопластическом деформировании, хорошо коррелирует с работой W_p тензора микронапряжений ρ_{ij} на пластических деформациях e_{ij}^p :

$$\dot{W}_p = \rho_{ij} \dot{e}_{ij}^p, \quad W_p = \int \rho_{ij} de_{ij}^p. \quad (19)$$

При определении ресурсных характеристик при МнЦУ используется подход [25], основанный на энергетическом критерии, который записывается выражением:

$$\sum_{i=1}^{N_p} \left[\Delta W_i - \Delta W_R \left(\frac{\Delta W_i}{\Delta W_R} \right)^\alpha \right] = \Delta W_0 = \text{const}, \quad (20)$$

где ΔW_0 – опасная часть рассеянной энергии за цикл нагружения, коррелирующей с

энергией, идущей на образование микродефектов; ΔW_i – полная рассеянная энергия за цикл нагружения; ΔW_R – рассеянная энергия за цикл нагружения при напряжении, равном пределу выносливости.

Рассмотрим выражение (20) для одного цикла нагружения в виде:

$$\Delta W_0 = \Delta W_i - \Delta W_R \left(\frac{\Delta W_i}{\Delta W_R} \right)^\alpha = \Delta W_i - \Delta W_H, \quad (21)$$

где $\Delta W_H = \Delta W_R (\Delta W_i / \Delta W_R)^\alpha$ – неопасная часть рассеянной энергии за цикл нагружения, связанной с фазовыми переходами, структурными изменениями и процессами тепловыделения.

Ю.Г. Коротких для регулярного циклического нагружения обобщил соотношение (21) в виде [25]:

$$\Delta W_e^{on} = \Delta W_e [1 - f(\gamma)], \quad \gamma = \sigma_u / \sigma_u^R, \quad (22)$$

где σ_u – интенсивность девиатора напряжений; σ_u^R – интенсивность девиатора напряжений, соответствующая условному пределу выносливости материала σ_u^R ; $f(\gamma)$ – функция, характеризующая степень влияния механизма МнЦУ на кривую усталости.

На основе (20) и (22) выражение для опасной энергии за цикл нагружения представим в виде:

$$\Delta W_0 = \Delta W_i(\gamma) - \Delta W_H(\gamma) = \Delta W_i(\gamma) \left[1 - \frac{\Delta W_H(\gamma)}{\Delta W_i(\gamma)} \right] = \Delta W_i [1 - f(\gamma)], \quad (23)$$

$$f(\gamma) = \frac{\Delta W_H(\gamma)}{\Delta W_i(\gamma)}. \quad (24)$$

Функция $f(\gamma)$ учитывает относительную величину неопасной энергии в полной рассеянной энергии, затраченной на пластическое деформирование и зависящей от параметра γ , характеризующего относительный уровень действующих максимальных напряжений в цикле нагружения:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\tilde{\sigma}_u^*}{\tilde{\sigma}_{hcf}^*}, \\ \tilde{\sigma}_u^* &= [(\sigma'_{ij} - \rho_{ij}^r)(\sigma'_{ij} - \rho_{ij}^r)]^{1/2}, \\ \tilde{\sigma}_{hcf}^* &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{hcf} + \int_0^t \dot{C}_m^{cyc} dt. \end{aligned} \quad (25)$$

В выражении (25) $\tilde{\sigma}_u^*$ – нормированная интенсивность девиатора тензора напряжений; $\tilde{\sigma}_{hcf}^*$ – нормированное значение интенсивности напряжений, при котором происходит переход от механизма МЦУ к МнЦУ с учетом процессов упрочнения/разупрочнения конструкционного материала (точка перегиба на полной кривой усталости).

Для определения ресурсных характеристик конструкционных материалов (металлов и их сплавов) при деградации материала по механизму МЦУ и МнЦУ в качестве энергии повреждения принимается соотношение:

$$\Delta W_0 = \sum_{i=1}^{N_f} \Delta W_i [1 - f(\gamma)]. \quad (26)$$

Функция $f(\gamma)$ зависит от параметра $\gamma = \sigma_u/C_p$, характеризующего относительный уровень действующих напряжений в цикле нагружения:

$$f(\gamma) = \begin{cases} 0 & \text{при } \gamma > 1, \\ 1 - \left(\frac{\gamma - \gamma_*}{1 - \gamma_*} \right)^n & \text{при } \gamma_* \leq \gamma \leq 1, \\ 1 & \text{при } \gamma < \gamma_*. \end{cases} \quad (27)$$

На рис. 1 приведен вид функции $f(\gamma)$ (ГЦУ – гигацикловая усталость).

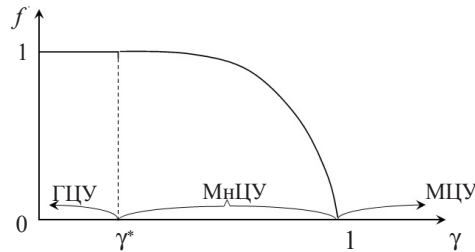


Рис. 1. Графическое представление функции $f(\gamma)$

Влияние непропорциональности нагружения, при котором компоненты тензоров напряжений и деформаций меняются не в фазе (главные площадки тензоров вращаются), а тензоры напряжений и пластических деформаций не соосны, заключается в следующем:

- форма траектории деформирования является параметром, существенно влияющим на усталостную долговечность;
- конструкционные материалы демонстрируют сложное циклическое поведение в условиях многоосного непропорционального нагружения – дополнительное циклическое упрочнение или разупрочнение;
- при непропорциональном циклическом нагружении критерий эквивалентных деформаций или интенсивности деформаций не является критерием эквивалентности и может привести к неконсервативным оценкам.

Учитывая полученные результаты, общую структуру эволюционных уравнений накопления усталостных повреждений в элементарном объеме материала при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости можно представить в виде:

$$\dot{\omega}_p = f_1(\beta) f_2(\omega_p) f_3(W_p) \dot{W}_p. \quad (28)$$

В (28) введены функции: $f_1(\beta)$ – функция, учитывающая влияние «жесткости» напряженно-деформированного состояния; $f_2(\omega_p)$ – функция, учитывающая влияние накопленного уровня поврежденности на скорость накопления повреждений; $f_3(W_p)$ – функция текущего относительного уровня рассеянной энергии, идущей на образование микродефектов:

$$\begin{aligned} f_1(\beta) &= \exp(k_p \beta), \\ f_2(\omega_p) &= \begin{cases} 0 & \text{при } W_p \leq W_{pa}, \\ c \omega_p^{-1/2} (1 - \omega_p)^{-2/3} & \text{при } W_p > W_{pa}, \end{cases} \\ f_3(W_p) &= (W_p - W_{pa}) / (W_{pf} - W_{pa}), \end{aligned} \quad (29)$$

где константа интегрирования $c \approx 0,806$.

Принимается, что кинетика накопления повреждений состоит из двух стадий – стадии зарождения микродефектов и стадии их слияния. Эти стадии разграничиваются значением величины рассеянной энергии W_p^a . Образование макродефекта происходит при достижении величиной рассеянной энергии значения W_p^f .

Критерий прочности поврежденного материала

Интегрируя эволюционное уравнение (28) для величины поврежденности совместно с определяющими уравнениями циклической пластичности (1)–(15) при известной истории нагружения можно получить условие образования макроскопической трещины (критерий разрушения). При этом в момент достижения величины поврежденности критического значения $\omega = \omega_f$ материал в рассматриваемом элементарном объеме настолько поврежден, что любое дальнейшее нагружение по существу невозможно без того, чтобы не произошло разрушение объема материала на макроскопическом уровне.

Учитывая вышесказанное, в качестве критерия окончания фазы развития рассеянных микроповреждений можно принять условие достижения величиной поврежденности ω своего критического значения $\omega = \omega_f \leq 1$.

2. Численные результаты

В статье [24] представлены экспериментальные данные о циклическом неупругом деформировании и усталостном разрушении сталей 20 и 08X18H12T при одночастотном нагружении с низкой частотой, одночастотном нагружении с высокой частотой и двухчастотном нагружении с различными частотами. Исследование усталости металлов как при одночастотном, так и при двухчастотном режимах нагружения проводили на установке МИР-СТ, предназначенной для испытаний металлических образцов на усталость при одноосном растяжении-сжатии в условиях симметричного и асимметричного циклов нагружения.

Испытывались гладкие цилиндрические образцы конструкционных сталей – среднеуглеродистой стали 20 (в условиях поставки) и аустенитных сталей 08X18H12T (1) (исходное состояние) и 08X18H12T (2) (после эксплуатационной наработки).

Каждый из вышеперечисленных материалов исследовали при следующих режимах нагружения:

- режим нагружения 1 – одночастотное высокочастотное (34 Гц) нагружение при симметричном цикле;
- режим нагружения 2 – одночастотное высокочастотное (34 Гц) нагружение при асимметричном цикле (среднее напряжение цикла $\sigma_m = 50$ МПа);
- режим нагружения 3 – одночастотное низкочастотное (малоцикловое – частота 0,082 Гц) нагружение при асимметричном цикле ($\sigma_m = 50$ МПа);
- режим нагружения 4 – двухчастотное нагружение при переменной асимметрии цикла, изменяющейся в пределах от 0 до 100 МПа.

В результате исследования усталостной долговечности сплавов при указанных режимах нагружения были получены кривые усталости в координатах «амплитуда напряжения – логарифм числа циклов до разрушения».

В таблицах 1–5 для сталей 20, 08X18H12T (1) и 08X18H12T (2) представлены основные физико-механические характеристики и материальные параметры МПС, определенные по результатам эксперимента и используемые в расчетах.

Таблица 1

**Основные физико-механические характеристики
и параметры модели МПС конструкционных сталей**

Характеристики	Материал		
	08X18H12T (1)	08X18H12T (2)	Сталь 20
K , МПа	166667	166667	166667
G , МПа	76923	76923	76923
C_m^0 , МПа	85	90	82
g_1^m , МПа	400000	400000	200000
g_2^m	5600	5600	2000
g_1^p , МПа	24090	24090	19000
g_2^p	289	289	224
g_1^r , МПа	4000	4000	1200
g_2^r	0	0	0
a_ξ	5	5	6
W_a , МДж/м ³	0	0	0
W_p^f , МДж/м ³	2900	2884	13980
$(2/3)^{1/2}\sigma_{hcf}$	180	196	229
γ_*	0,8182	0,8400	0,7473
n	1,55	3,1	1,05

Таблица 2

**Зависимость модуля монотонного изотропного упрочнения q_1 от длины траектории
пластического деформирования χ для среднеуглеродистой стали 20 ($q_2 = 0$)**

χ	0	0,0006	0,0012	0,0024	0,0042	0,006	0,0102	0,0132	0,015
q_1 , МПа	0	0	-11709	-11170	-10360	3200	280	120	0

Значения модулей монотонного изотропного упрочнения q_1 и q_2 для сталей аустенитного класса 08X18H12T (1) и 08X18H12T (2) приняты не зависящими от χ и равными нулю.

Таблица 3

**Зависимость $Q_{1\xi}$ от максимального значения интенсивности тензора
пластических деформаций для стали аустенитного класса 08X18H12T (1) ($Q_{2\xi} = 0$)**

$a_{e\max}$	0	0,00015	0,000162	0,000165	0,000192	0,000248	0,000350
$Q_{1\xi}$, МПа	25	30	39	54	78	84	85

Таблица 4

**Зависимость $Q_{1\xi}$ от максимального значения интенсивности тензора
пластических деформаций для стали аустенитного класса 08X18H12T (2) ($Q_{2\xi} = 0$)**

$a_{e\max}$	0	0,00024	0,000266	0,000284	0,000331	0,00035	0,0004
$Q_{1\xi}$, МПа	25	32	43	61	77	82	90

Таблица 5

**Зависимость $Q_{1\xi}$ от максимального значения интенсивности тензора
пластических деформаций для среднеуглеродистой стали 20 ($Q_{2\xi} = 0$)**

$a_{e\max}$	0	0,0004	0,000451	0,000508	0,000591	0,00075	0,0001
$Q_{1\xi}$, МПа	30	52	55	65	70	74	78

На рис. 2, 3 приведены расчетные кривые одноосного растяжения для стали 20 и сталей 08X18H12Т (1), 08X18H12Т (2).

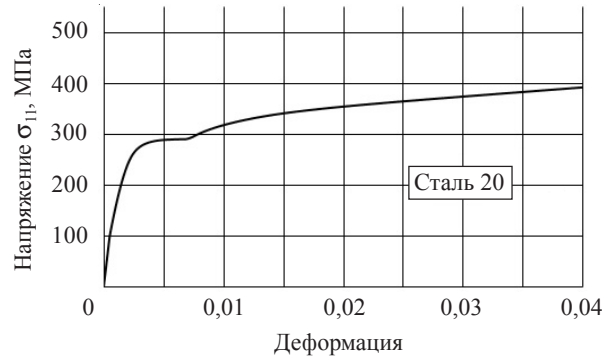


Рис. 2. Расчетная диаграмма растяжения

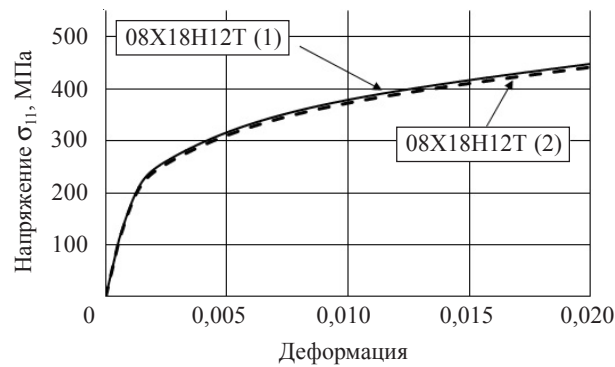


Рис. 3. Расчетные диаграммы растяжения

На рис. 4–6 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных кривых усталости для сталей 08X18H12Т (1), 08X18H12Т (2) и стали 20. Здесь штриховыми линиями отмечены осредненные опытные данные, круглыми красными маркерами – результаты расчетов по предложенной модели МПС, а черными маркерами – экспериментальные точки. Видно, что в области МЦУ и в переходной области расчеты по модели МПС качественно и количественно согласуются с опытными данными.

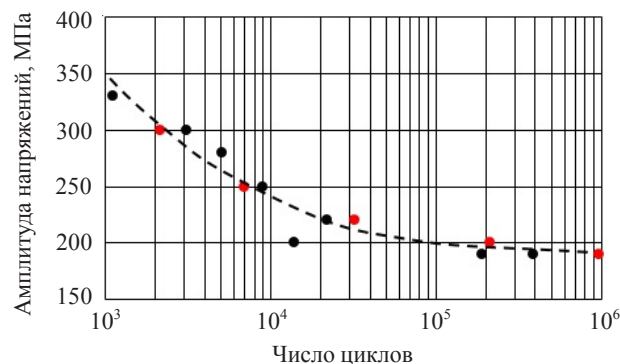


Рис. 4. Кривая усталости для стали 08X18H12Т (1) при одночастотном нагружении

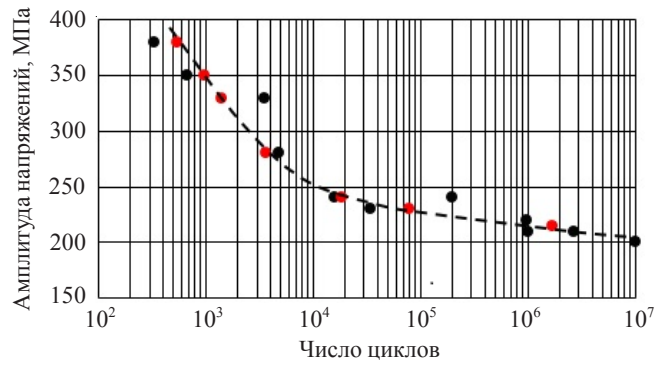


Рис. 5. Кривая усталости для стали 08X18N12Т (2) при одночастотном нагружении

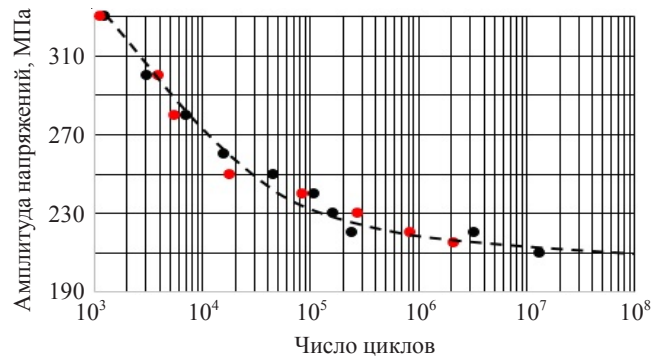


Рис. 6. Кривая усталости для стали 20 при одночастотном нагружении

На рис. 7–9 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных кривых усталости при двухчастотном нагружении для сталей 08X18N12Т (1), 08X18N12Т (2) и стали 20 в циклах с высокой частотой.

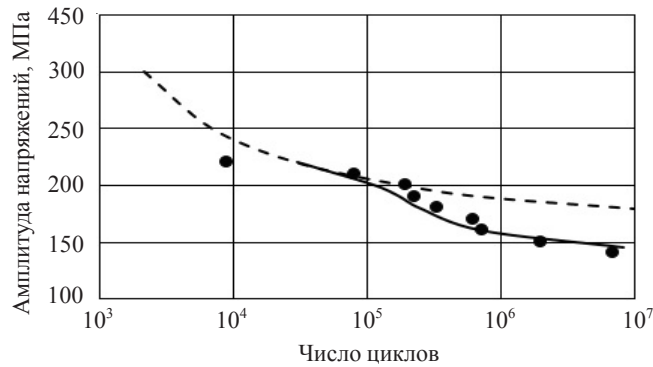


Рис. 7. Кривая усталости для стали 08X18N12Т (1) при двухчастотном нагружении в циклах с высокой частотой

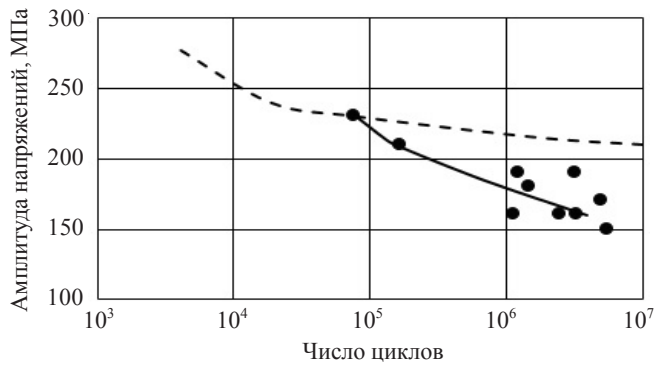


Рис. 8. Кривая усталости для стали 08X18N12Т (2) при двухчастотном нагружении в циклах с высокой частотой

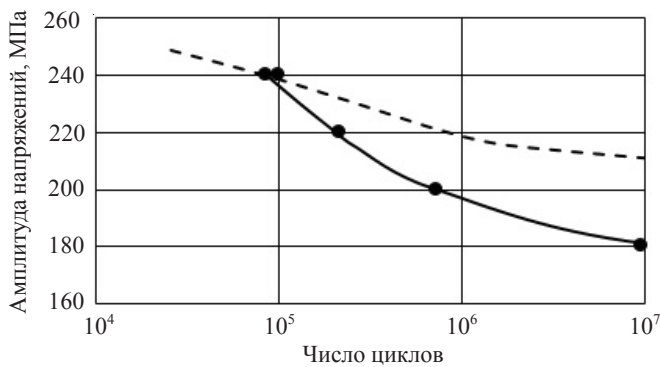


Рис. 9. Кривая усталости для стали 20 при двухчастотном нагружении в циклах с высокой частотой

На рис. 10–12 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных кривых усталости при двухчастотном нагружении для сталей 08X18N12Т (1), 08X18N12Т (2) и стали 20 в циклах с низкой частотой.

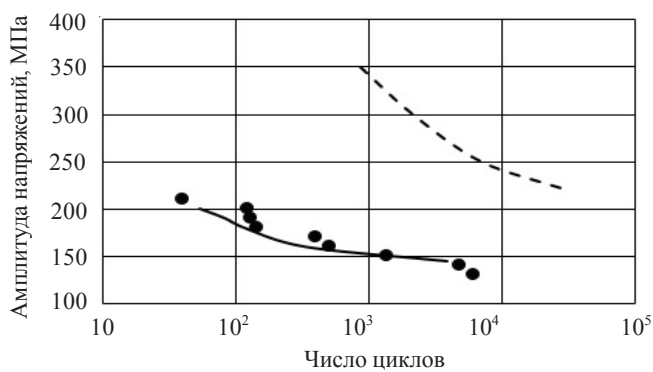


Рис. 10. Кривая усталости для стали 08X18N12Т (1) при двухчастотном нагружении в циклах с низкой частотой

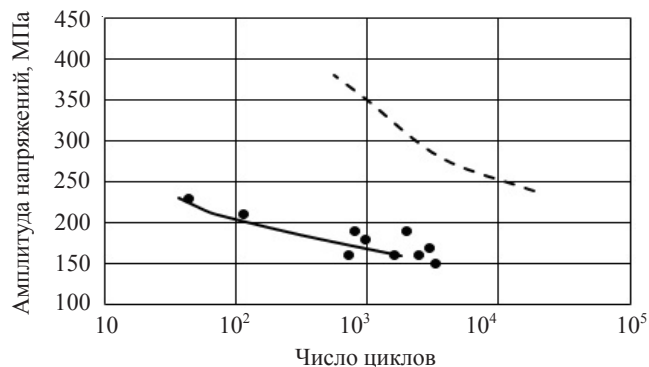


Рис. 11. Кривая усталости для стали 08X18N12Т (2) при двухчастотном нагружении в циклах с низкой частотой

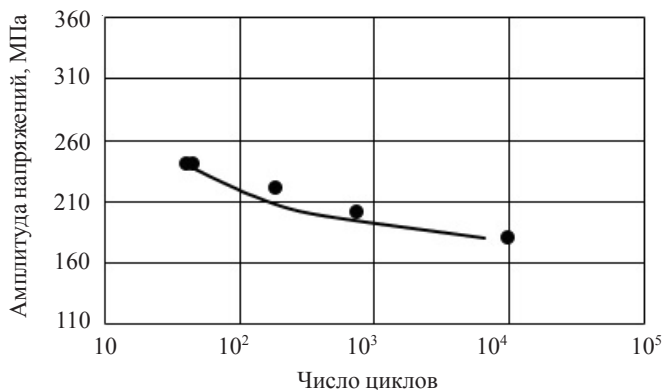


Рис. 12. Кривая усталости для стали 20 при двухчастотном нагружении в циклах с низкой частотой

Здесь штриховыми линиями отмечены численные данные при одночастотном нагружении, сплошной черной линией отмечены численные данные при двухчастотном нагружении, а круглыми черными маркерами – экспериментальные результаты при двухчастотном нагружении. Видно, что расчеты по модели МПС качественно и количественно согласуются с опытными данными.

Заключение

Для моделирования усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при совместном действии механизмов, сочетающих мало- и многоцикловую усталость, а также двухчастотности нагружения проведена оценка достоверности определяющих соотношений МПС путем сопоставления результатов численных экспериментов с опытными данными по накоплению усталостных повреждений в ряде конструкционных сплавов (08X18N12Т (1), 08X18N12Т (2), сталь 20) при циклическом двухчастотном нагружении, которая подтвердила правильность моделирования и определения материальных параметров.

Список литературы

1. Коллинз Дж. *Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение*. М.: Мир, 1984. 624 с.
2. Романов А.Н. *Разрушение при малоцикловом нагружении*. М.: Наука, 1988. 279 с.
3. Трошенко В.Т. *Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении*. Киев: Наукова думка, 1981. 343 с.
4. Лэмба Г.С., Сайдботтом О.М. Пластичность при циклическом деформировании по непропорциональным траекториям. Ч. 1. Эксперименты с циклическим упрочнением, приспособляемостью и последующим деформационным упрочнением. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия Д. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1978. Т. 100. №1. С. 108–117.
5. Макдауэлл Д.Л.. Экспериментальное изучение структуры определяющих уравнений для непропорциональной циклической пластичности. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия Д. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1985. №4. С. 98–111.
6. Охаси И., Каваи М., Каито Т. Неупругое поведение стали 316 при многоосных непропорциональных циклических нагружениях при повышенной температуре. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия Д. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1985. Т. 107. No 2. P. 6–15.
7. Tanaka E., Murakami S., Ooka M. Effects of strain path shapes on nonproportional cyclic plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1985. Vol. 33. Iss. 6. P. 559–575. DOI:10.1016/0022-5096(85)90003-1.
8. Taleb L., Cailletaud G., Sat 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. DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.05.006.
9. Митенков Ф.М., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г. и др. *Методы обоснования ресурса ЯЭУ*. М.: Машиностроение, 2007. 448 с.
10. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
11. Волков И.А., Игумнов Л.А. *Введение в континуальную механику поврежденной среды*. М.: Физматлит, 2017. 304 с.
12. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г., Казаков Д.А., Емельянов А.А., Тарасов И.С., Гусева М.А. Программная реализация процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при термомеханическом нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №2. С. 188–207. DOI: 10.32326/1814-9146-2016-78-2-188-207.
13. Мураками С. Сущность механики поврежденной среды и ее приложение к теории анизотропных повреждений при ползучести. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия Д. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1983. №2. С. 44–50.
14. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия Д. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1985. Т. 107. № 1. С. 90–98.
15. Боднер С.Р., Линдхолм У.С. Критерий приращения повреждения для зависящего от времени разрушения материалов. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия Д. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1976. Т. 100. №2. С. 51–58.
16. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*. 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302. [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(89\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0749-6419(89)90015-6).
17. Трошенко В.Т. Рассеянные усталостные повреждения металлов и сплавов. Сообщение 3. Деформационные энергетические критерии. *Проблемы прочности*. 2006. №1. С. 5–31.
18. Хамаза Л.А., Коваленко В.А. Сопrotивление металлов усталостному разрушению и деформированию при двухчастотном нагружении. Сообщение 1. Методика и результаты исследования усталости и неупругости металлов при двухчастотном циклическом нагружении. *Проблемы прочности*. 1989. №10. С. 7–18.

19. Новожилов В.В. О перспективах феноменологического подхода к проблеме разрушения. *Механика деформируемых тел и конструкций*. М.: Машиностроение, 1975. С. 349–353.
20. Митенков Ф.М., Волков И.А., Игумнов Л.А. и др. *Прикладная теория пластичности*. М.: Физматлит, 2015. 284 с.
21. Волков И.А., Игумнов Л.А., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н., Пичков С.Н., Маркова М.Т. Моделирование пластического деформирования поликристаллических конструкционных сплавов при блочных несимметричных режимах мягкого малоциклового нагружения. *Проблемы прочности и пластичности*. 2019. Т. 81. №1. С. 63–76. DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-1-63-76.
22. Большухин М.А., Зверев Д.Л., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г. Оценка долговечности конструкционных материалов при совместных процессах малоциклового и многоциклового усталости. *Проблемы прочности и пластичности*. 2010. Вып. 72. С. 28–35.
23. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Панов В.А., Шишулин Д.Н. Моделирование процессов накопления усталостных повреждений в конструкционных сталях при блочном малоцикло-вом нагружении. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2014. Т. 7. №1. С. 15–22.
24. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. *Прикладная теория вязкопластичности*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 317 с.
25. Антипов А.А., Горохов А.Н., Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А. Экспериментально-теоретическое исследование усталости материалов и конструкций в условиях высокотемпературных многоциклового нагружений. *Проблемы прочности и пластичности*. 2014. Вып. 76. Ч. 1. С. 26–38. DOI: 10.32326/1814-9146-2014-76-1-26-38.

References

1. Collins J.A. *Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention*. New York. JohnWiler & Sons. 1981. 672 p.
2. Romanov A.N. *Razrushenie pri malotsiklovom nagruzhenii [Failure under Low-Cycle Loading]*. Moscow. Nauka Publ. 1988. 279 p. (In Russian).
3. Troshchenko V.T. *Deformirovanie i razrushenie metallov pri mnogotsiklovom nagruzhenii [Deformation and Fracture of Metals under High-Cycle Loading]*. Kiev. Naukova dumka Publ. 1981. 343 p. (In Russian).
4. Lamba H.S., Sidebottom O.M. Cyclic plasticity for nonproportional paths. Part 1. Cyclichardening, erasure of memory, and subsequent strain hardening experiments. *J. Eng. Mater. Technol.* 1978. Vol. 100. No 1. P. 96–103. DOI:10.1115/1.3443456.
5. McDowell D.L. An experimental study of the structure of constitutive equations for nonproportional cyclic plasticity. *J. Eng. Mater. Technol.* 1985. Vol. 107. No 4. P. 307–315. DOI:10.1115/1.3225824.
6. Ohashi Y., Kawai M., Kaito T. Inelastic behavior of type 316 stainless steel under multiaxialnonproportional cyclic stressings at elevated temperature. *J. Eng. Mater. Technol.* 1985. Vol. 107. No 2. P. 101–109. DOI:10.1115/1.3225781.
7. Tanaka E., Murakami S., Ōoka M. Effects of strain path shapes on nonproportional cyclic plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1985. Vol. 33. Iss. 6. P. 559–575. DOI:10.1016/0022-5096(85)90003-1.
8. Taleb L., Cailletaud G., Sai 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. DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.05.006.
9. Mitenkov F.M., Kaydalov V.B., Korotkikh Yu.G. *Metody obosnovaniya resursa yadernykh energeticheskikh ustanovok [Methods of Substantiation of the Resource of Nuclear Power Plants]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 2007. 448 p. (In Russian).
10. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami [Equations of State of Viscoelastic Plastic Media with Damage]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).
11. Volkov I.A., Igumnov L.A. *Vvedenie v kontinualnuyu mekhaniku povrezhdennoy sredy [Introduction to the Continuum Mechanics of a Damaged Medium]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2017. 304 p. (In Russian).

12. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G., Kazakov D.A., Yemelyanov A.A., Tarasov I.S., Guseva M.A. Programmaya realizatsiya protsessov vyzkoplasticheskogo deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktsionnykh splavakh pri termomekhanicheskom nagruzhenii [Software implementation of viscoplastic deformation and damage accumulation processes in structural alloys under thermal-mechanical]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 2. P. 188–207. DOI: 10.32326/1814-9146-2016-78-2-188-207
13. Murakami S. Notion of continuum damage mechanics and its application to anisotropic creep damage theory. *J. Eng. Mater. Technol.* 1983. Vol. 105. Iss. 2. P. 99–105.
14. Lemaitre J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *J. Eng. Mater. Technol.* 1985. Vol. 107. No 1. P. 83–89. DOI: 10.1115/1.3225775.
15. Bodner S.R., Lindholm U.S. An incremental criterion for time-dependent failure of materials. *J. Eng. Mater. Technol.* 1976. Vol. 98. No 2. P. 140–145. DOI:10.1115/1.3443356.
16. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*. 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302. [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(89\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0749-6419(89)90015-6).
17. Troshchenko V.T. Raseyannye ustalostnye povrezhdeniya metallov i splavov. Soobshchenie 3. Deformatsionnye energeticheskie kriterii [Disipated fatigue damage to metals and alloys. Message 3. Strain energy criteria]. *Problemy prochnosti [Problems of Strength]*. 2006. No 1. P. 5–31 (In Russian).
18. Khamaza L.A., Kovalenko V.A. Resistance of metals to fatigue failure and deformation during two-frequency loading. Report 1. Test methods and results on the fatigue and inelasticity of metals during two-frequency cyclic loading. *Strength of Materials*. 1989. Vol. 21. Iss. 10. P. 1285–1292.
19. Novozhilov V.V. O perspektivakh fenomenologicheskogo podkhoda k probleme razrushe-niya [On the prospects of a phenomenological approach to the problem of destruction]. *Mekhanika deformiruyemykh tel i konstruksiy [Mechanics of Deformable Bodies and Structures]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1975. P. 349–353 (In Russian).
20. Mitenkov F.M., Volkov I.A., Igumnov L.A. et al. *Prikladnaya teoriya plastichnosti [Applied Theory of Plasticity]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2015. 284 p. (In Russian).
21. Volkov I.A., Igumnov L.A., Tarasov I.S., Shishulin D.N., Pichkov S.N., Markova M.T. Modelirovanie plasticheskogo deformirovaniya polikristallicheskikh konstruktsionnykh splavov pri blochnykh nesimmetrichnykh rezhimakh myagkogo malotsiklovogo nagruzheniya [Modeling plastic deformation of polychrystalline structural alloys under block-type nonsymmetrical regimes of soft low-cycle loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2019. Vol. 81. No 1. P. 63–76. DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-1-63-76 (In Russian).
22. Bolshuhin M.A., Zverev D.L., Kaidalov V.B., Korotkikh Yu.G. Otsenka dolgovechnosti konstruktsionnykh materialov pri sovmestnykh protsessakh malotsiklovoy i mnogotsiklovoy ustalosti [Assessing the service life of structural materials under combined processes of low-cycle and high-cycle fatigue]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2010. Iss. 72. P. 28–35 (In Russian).
23. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Panov V.A., Shishulin D.N. Modelirovanie protsessov nakopleniya ustalostnykh povrezhdeniy v konstruktsionnykh stalyakh pri blochnom malotsiklovom nagruzhenii [Modeling of fatigue damage accumulation in structural steels under low-cycle block loading]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred [Computational Continuum Mechanics]*. 2014. Vol. 7. No 1. P. 15–22 (In Russian).
24. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G. *Prikladnaya teoriya vyzkoplastichnosti [Applied Theory of Viscoplasticity]*. Nizhny Novgorod. UNN Publ. 2015. 318 p. (In Russian).
25. Antipov A.A., Gorokhov A.N., Gorokhov V.A., Kazakov D.A., Kapustin S.A. Eksperimentalno-teoreticheskoe issledovanie ustalosti materialov i konstruksiy v usloviyakh vysokotemperaturnykh mnogotsiklovnykh nagruzheniy [Experimental and theoretical studies fatigue of materials and structures under high-temperature and high-cycle loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2014. Iss. 76. Pt. 1. P. 26–38 (In Russian). DOI: 10.32326/1814-9146-2014-76-1-26-38.

MODELING OF THE FATIGUE DURABILITY OF STRUCTURAL ALLOYS UNDER TWO-FREQUENCY LOADING

Shishulin D.N., Boev E.V.

*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The processes of fatigue life of polycrystalline structural alloys under the combined action of low- and high-cycle fatigue mechanisms are considered. From the standpoint of damaged medium mechanics (DMM), a mathematical model has been developed that describes the processes of plastic deformation and the accumulation of fatigue damage. The DMM model consists of three interrelated parts: relations that determine the cyclic elastoplastic behavior of the material, taking into account the dependence on the fracture process; equations describing the kinetics of fatigue damage accumulation; criterion for the strength of the damaged material.

Variant of the constitutive relations for elastoplasticity is based on the concept of a microplastic loading surface in the von Mises form and the principle of the gradient of the plastic strain rate vector to the surface at the loading point. This version of the equations of state reflects the main effects of the process of cyclic plastic deformation of the material for arbitrary complex loading trajectories.

A variant of the kinetic equations for the accumulation of fatigue damage is based on the introduction of a scalar damage parameter, is based on energy principles and takes into account the main effects of the formation, growth and fusion of microdefects under arbitrary complex loading conditions. A unified form of the evolutionary equation for the accumulation of fatigue damages for low-cycle and high-cycle fatigue is proposed.

As a criterion for the strength of the damaged material, the condition for reaching the critical value of the damage is used.

To assess the reliability and determine the limits of applicability of the constitutive relations of the DMM, numerical studies of the processes of accumulation of fatigue damage by cyclic inelastic deformation and fatigue failure of steel 20 and 08X18H12T were carried out under single-frequency loading of the upper frequency and two-frequency loading with different amplitude ratios. And the comparison of the obtained numerical results with the data of field experiments is carried out. The results of comparing the calculated and experimental data showed that the developed model of the damaged environment reliably describes the durability of structures under the action of low- and high-cycle fatigue mechanisms.

Keywords: low-cycle fatigue, high-cycle fatigue, deformation, stress, damage, modeling, mechanics of a damaged medium, two-frequency loading, numerical and full-scale experiment.