

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ОДНОЧАСТОТНОМ И ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2022 г. И. А. Волков^{a,*}, Л. А. Игумнов^{a,**}, Д. Н. Шишулин^{a,***}, Е. В. Боев^{a,****}

^a *Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия*

**e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru*

***e-mail: igumnov@mech.unn.ru*

****e-mail: shishulindn@gmail.ru*

*****e-mail: e.boev87@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.04.2021 г.

После доработки 03.08.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

В настоящей работе проведены исследования упругопластического поведения и ресурсных характеристик для широко используемых в промышленности конструкционных материалов при усталостном одночастотном и двухчастотном нагружении. Развита математическая модель механики поврежденной среды, позволяющая моделировать упругопластическое поведение и определять ресурсные характеристики для конструкционных материалов при усталостном нагружении. Рассматриваются процессы малоциклового и многоциклового усталости. Модель базируется на совместном интегрировании уравнений, описывающих кинетику напряженно-деформированного состояния и процессов накопления повреждений. Замыкающим соотношением является критерий прочности, выполнение которого соответствует образованию макротрещины.

Уравнения пластичности основываются на основных положениях теории течения. В основе соотношений, моделирующих накопление повреждений лежит энергетический подход к определению ресурсных характеристик. Кинетика накопления усталостных повреждений основана на введении скалярного параметра поврежденности конструкционного материала и единой энергетической форме представления механизма деградации в условиях малоциклового и многоциклового нагружения. По предложенной математической модели механики поврежденной среды проведены численные исследования процессов кинетики напряженно-деформированного состояния и разрушения поликристаллических материалов – сталей 20 и 08Х18Н12Т в условиях одночастотного и двухчастотного усталостного нагружения. Результаты оценки достоверности показали, что развитая модель с высокой степенью точности описывает процессы малоциклового и многоциклового усталости.

Ключевые слова: механика поврежденной среды, упругая деформация, пластическая деформация, поврежденность, численное моделирование, малоцикловая усталость, многоцикловая усталость, двухчастотное нагружение

DOI: 10.31857/S0572329922010111

1. Введение. Экспериментальные исследования усталости конструкционных материалов (поликристаллических металлов и их сплавов) позволяют сделать вывод, что

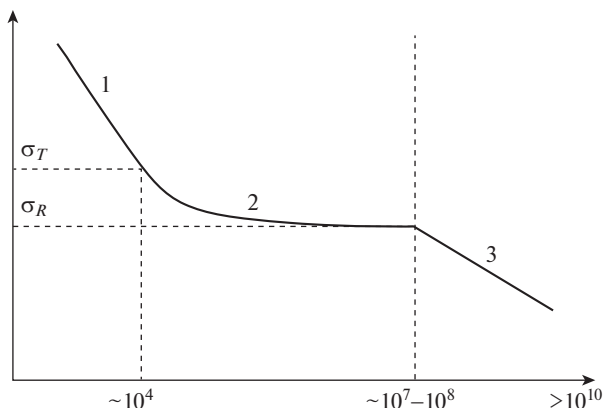


Рис. 1. Кривая усталости.

усталость условно можно разделить как минимум на три области (рис. 1), характеризующиеся особенностями протекающих процессов накопления повреждений — область малоцикловой усталости обозначена цифрой 1, область многоцикловой усталости обозначена цифрой 2 и область гигацикловой усталости обозначена цифрой 3 [1–4].

Основной характерной особенностью малоцикловой усталости (МЦУ) является наличие в процессе нагружения макроскопических пластических деформаций во всем рассматриваемом объеме конструкционного материала. Данную область циклического нагружения в условиях одноосного нагружения лабораторных образцов (растяжения–сжатия) условно ограничивают числом циклов до образования макротрещины равным 10^4 . Данный деградационный механизм характерен для зон с конструктивными концентраторами напряжений, такие как корень сварного шва, переходы с малыми радиусами скругления и т.п. с номинальными напряжениями в сечении конструктивного элемента $\sim 0.5\div 0.8$ от предела текучести σ_T и превышающим предел текучести в самом концентраторе. Для малоцикловой усталости характерны проявления эффектов упрочнения и разупрочнения материала, вызванные изменениями микроструктуры и фазового состава. При малоцикловой усталости кинетика образования и роста микродефектов зависит от истории нагружения конструкционного материала и его циклических свойств [5–7].

Характерной особенностью многоцикловой усталости (МнЦУ) является наличие в процессе циклического нагружения микроскопических пластических деформаций при уровнях интенсивности действующих напряжений меньших чем предел текучести и больше, чем предел выносливости σ_R на заданной базе числа циклов нагружения для конструкционного материала. Область многоциклового нагружения условно ограничивается числом циклов до образования макротрещины при одноосном нагружении лабораторных образцов (растяжении–сжатии) в диапазоне от 10^5 до 10^7 . При многоцикловой усталости материала накопление повреждений происходит за счет процессов на микро- и мезоуровнях вследствие микроскопической пластической деформации, реализующейся за счет пластического деформирования отдельных разнесенных зерен и их конгломератов по объему конструкционного материала [3, 4].

Гигацикловая усталость конструкционных материалов возникает при воздействии нагрузок не превосходящих предела выносливости σ_R . Накопление повреждений при гигацикловой усталости описывается физическими моделями развития микротрещин и микропор в районе точечных дефектов и включений в поликристаллическом мате-

риале [4]. Особенностью разрушения при гигацикловой усталости является превалирующее влияние на ресурсные характеристики конструкционных материалов стадии зарождения усталостных микротрещин, так как процессы накопления повреждений ассоциируются с дефектами различной физической природы. Качественным отличием гигацикловой усталости от МЦУ и МнЦУ является то, что зарождение дефектов и дальнейшее развитие поврежденности происходит в локальных объемах материала. В связи с этим возникает существенная проблема при решении задачи оценки ресурсных характеристик при гигацикловой усталости — необходимость формирования критериев перехода от эволюционного развития точечных и неравномерно распределенных дефектов к макроскопическому разрушению [3].

В [5–12] на базе основных положений механики поврежденной среды развита математическая модель, описывающая процессы кинетики напряженно-деформированного состояния и накопления повреждений в поликристаллических металлах и их сплавах при нерегулярном термосиловом нагружении. В [13, 16] для оценки ресурсных характеристик при многоцикловой усталости приведен энергетический критерий и его экспериментальное обоснование.

Особое место при расчетах ресурсных характеристик машин и аппаратов новой техники, а также при продлении ресурса действующих инженерных объектов занимают виды нагружения в условиях которых реализуется суммарное воздействие от низкочастотных и высокочастотных нагрузок. Данный вид нагружения существенно влияет на пластические и ресурсные характеристики конструкционного материала. Достаточно большое количество работ, связанных с исследованиями процессов двухчастотного нагружения, посвящено разработке аналитических зависимостей для расчетной оценки ресурсных характеристик, однако они в основном основаны на критериальных подходах и не учитывают всей истории нагружения при эксплуатационном воздействии [13–16]. Необходимо отметить, что накопление повреждений при воздействии двухчастотного нагружения является существенно нелинейным процессом и определяющим образом зависит от кинетики напряженно-деформированного состояния и температуры нагружения. Анализ имеющихся экспериментальных данных при двухчастотном нагружении свидетельствует о существенном снижении циклической прочности по сравнению с одночастотным нагружением [14–17].

Таким образом, анализ экспериментальных и теоретических работ позволяет сделать вывод, что требуется научно-обоснованный подход к оценке ресурсных характеристик конструкционных материалов в условиях действия двух и более нагрузок, отличающихся по частоте и амплитуде воздействия. Подход должен основываться на физически обоснованных закономерностях, связывающих упругопластическое поведение материалов и ресурсные характеристики.

Один из подходов, позволяющих устранить данный недостаток, базируется на исследовании неупругих циклических деформаций как при раздельном, так и при двухчастотном нагружениях. Это особенно важно в связи с тем, что в ряде публикаций однозначно была показана взаимосвязь процессов неупругого деформирования и усталостного повреждения металлов [2, 13, 15, 16, 18].

Используемая в настоящей работе математическая модель механики поврежденной среды МПС [5–8] позволяет численно моделировать процессы кинетики напряженно-деформированного состояния при малоцикловой и многоцикловой усталости. Проверка достоверности полученных расчетных данных определялась из сравнения численных данных с результатами экспериментальных исследований.

2. Определяющие соотношения математической модели механики поврежденной среды. Основные гипотезы и положения для рассматриваемой математической модели МПС заключаются в том, что: рассматривается начально изотропный материал; рассматривается только анизотропия, связанная с процессами пластического деформирования; процесс поврежденности материала носит изотропный характер; тензоры

деформаций e_{ij} и их скоростей \dot{e}_{ij} являются суммой упругих e_{ij}^e, \dot{e}_{ij}^e и пластических компонент e_{ij}^p, \dot{e}_{ij}^p ; поверхность пластического нагружения описывается уравнением Мизеса; процессы деформирования характеризуются малыми деформациями; рассматривается только упругое изменение элементарного объема материала (пластическая несжимаемость); вводится скалярная мера поврежденности конструкционного материала ω , изменяющийся в диапазоне $\omega_o \leq \omega \leq \omega_f$; учитывается влияние поврежденности материала на процессы деформирования через тензор эффективных напряжений.

Математическая модель МПС состоит из соотношений, описывающих упругопластическое поведение конструкционного материала, уравнений накопления повреждений и критерия прочности поврежденного материала.

2.1. Определяющие соотношения пластичности. Принимается, что при упругом поведении материала девиаторная и шаровая составляющие тензоров напряжений и деформаций, а также их скоростей связаны обобщенным законом Гука:

$$\sigma = 3K[e - \alpha(T - T_0)], \quad \sigma_{ij} = 2Ge_{ij}^e, \quad \dot{\sigma} = 3K(\dot{e} - \dot{\alpha}T - \alpha\dot{T}) + \frac{\dot{K}}{K}\sigma$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = 2G\dot{e}_{ij}^e + \frac{\dot{G}}{G}\sigma_{ij}$$

где $\alpha(T)$ – коэффициент линейного температурного расширения материала, $K(T)$ – модуль объемной упругости, $G(T)$ – модуль сдвига, T_0 – базовая температура, T – текущая температура.

Поверхность пластического нагружения описывается в виде:

$$F_{pl} = S_{ij}S_{ij} - C_{pl}^2 = 0, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}$$

В пространстве пластических деформаций вводится поверхность “памяти”:

$$a_e = (e_{ij}^p - \xi_{ij})(e_{ij}^p - \xi_{ij}) - a_{e\max}^2 = 0 \quad (2.1)$$

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 данные механизмы играют определяющую роль в точности оценок ресурсных характеристик. При усталостном нагружении реализуется конкуренция процессов упрочнения и разупрочнения вызванных в материале механизмами изменения фазового состава, микроструктурного состояния, изменением плотности дислокаций, а также влияние изменения температуры [19]. Физические механизмы, протекающие в поликристаллических металлах и сплавах, влияющие на процессы упрочнения и разупрочнения, зависят от действующей температуры, вида траектории деформирования, длины пути пластического деформирования, действующих амплитуд интенсивности пластической деформации и степени стабилизации процесса деформирования.

Для учета эффектов упрочнения и разупрочнения, проявляющихся вследствие протекания различных физических механизмов в поликристаллических металлах и их сплавах [20, 21], изменение радиуса поверхности пластического нагружения принимается в виде суммы скоростей изменений радиуса поверхности пластического нагружения при пластическом деформировании:

$$\dot{C}_{pl}(\chi, T) = \sum_{i=1}^h \dot{C}_{pl}^{(i)}(\chi) + \sum_{l=1}^k \dot{C}_{pl}^{(l)}(T)$$

где $\dot{C}_{pl}^{(i)}(\chi)$, $\dot{C}_{pl}^{(l)}(T)$ – скорости изменения радиуса поверхности пластического нагружения за счет вклада определенного физического механизма упрочнения либо разупрочнения конструкционного материала и изменения температуры; $\dot{C}_{pl}(\chi, T)$ – суммарная скорость изменения радиуса поверхности пластического нагружения определяемая аналогично интегральным по объему материала механическим макрохарактеристикам (предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести) с учетом вклада каждого физического механизма:

$$\dot{C}_{pl}(\chi, T) = \left[\sum_{i=1}^n q_{\chi}^{(i)} f_m^{(i)}(a_e) + \sum_{j=1}^m a_j (Q_s^{(j)} - C_{pl}^{(j)}) f_c^{(j)}(a_e) \right] \dot{\chi} + \left[\sum_{l=1}^k q_T^{(l)} \right] \dot{T} \quad (2.2)$$

где $q_{\chi}^{(i)}$ – параметры монотонного упрочнения (разупрочнения) за счет вклада i -го физического механизма; a_j , $Q_s^{(j)}$ – параметры циклического упрочнения (разупрочнения) за счет вклада j -го физического механизма; $f_m^{(i)}(a_e)$ и $f_c^{(j)}(a_e)$ – функции учитывающие характер пластического деформирования, $q_T^{(l)}$ – параметры скорости изменения радиуса поверхности пластического нагружения за счет вклада l -го физического механизма при изменении температуры.

Зависимость (2.2) описывает изотропное упрочнение (разупрочнение) при монотонном пластическом деформировании (первый член в скобке при $\dot{\chi}$), циклическом деформировании (второй член в скобке при $\dot{\chi}$) и от скорости изменения температуры \dot{T} .

Экспериментальное определение параметров, входящих в зависимость (2.2), описывающих изменение радиуса поверхности пластического нагружения должно проводиться на основании опытов в которых возможно выделение физических механизмов процессов упрочнения либо разупрочнения, таких как фазовые превращения, изменение микроструктуры и плотности дислокаций, и определения их вклада, также данные процессы можно исследовать с получением их количественных характеристик с использованием дополнительных средств неразрушающего контроля (акустический, виброакустический и др. [22–24]).

При пластическом деформировании конструкционного материала изменение фазового состава материала приводит либо только к эффекту упрочнения либо разупрочнения, а при изменении микроструктурного состояния и дислокационной картины, может возникать как эффект упрочнения, так и эффект разупрочнения конструкционного материала в зависимости от вида текущей траектории деформирования, причем проявление эффекта существенно зависит от степени стабилизации процесса деформирования в пространстве пластических деформаций. Результаты экспериментальных исследований в работах [13, 15, 16] показывают, что двухчастотное нагружение в отличие от одночастотного приводит к разупрочнению исследуемых материалов, а также в процессе нагружения отсутствует стабилизация петли пластического гистерезиса, что сопровождается постоянным изменением центра ξ_{ij} в уравнении (2.1), описывающего поверхность “памяти” a_e в пространстве пластических деформаций. Таким образом, в диапазоне температур T , при которых можно пренебречь эффектами отжига и конкретизируя параметры в зависимости (2.2) изотропное упрочнение (разупрочнение) можно записать как:

$$\dot{C}_{pl} = q_{\chi} \dot{\chi}_m + a_c (Q_{s\chi} - C_{pl}) \dot{\chi}_c + a_{\xi} (Q_{s\xi} - C_{pl}) \dot{\chi}_{\xi} + q_T \dot{T} \quad (2.3)$$

$$C_{pl} = C_{pl}^0 + \int_0^t \dot{C}_{pl} dt \quad (2.4)$$

$$\dot{\chi} = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \right)^{1/2}, \quad \chi = \int_0^t \dot{\chi} dt, \quad \dot{\chi}_{\xi} = \left(\frac{2}{3} \dot{\xi}_{ij} \dot{\xi}_{ij} \right)^{1/2}, \quad \chi_{\xi} = \int_0^t \dot{\chi}_{\xi} dt \quad (2.5)$$

$$\dot{\chi}_m = \begin{cases} 0, a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0 \\ \dot{\chi}, a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0 \end{cases}, \quad \dot{\chi}_c = \begin{cases} \dot{\chi}, a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0 \\ 0, a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$q_{\chi} = q_2 A - (1 - A) q_1, \quad Q_{s_{\chi, \xi}} = Q_{2\chi, \xi} A + (1 - A) Q_{1\chi, \xi} \quad (2.7)$$

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

В зависимостях (2.3)–(2.7) введены следующие обозначения: C_{pl}^0 – радиус поверхности пластического нагружения для конструкционного материала в исходном состоянии, q_1, q_2, q_T – модули монотонного изотропного упрочнения (разупрочнения) при монотонных нагружениях по лучевым путям, при изломе траектории деформирования на 90° и изменении температуры; $Q_{1\chi, \xi}, Q_{2\chi, \xi}$ – модули циклического изотропного упрочнения (разупрочнения), при пропорциональном нагружении и при изломе траектории деформирования на 90° соответственно; $a_{c, \xi}$ – постоянные, определяющие скорость процесса стабилизации формы петли гистерезиса при циклическом нагружении материала; $Q_{s_{\chi, \xi}}$ – стационарные значения радиуса поверхности текучести в зависимости от $a_{e_{\max}}$ и температуры T ; $\dot{\chi}_m$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования материала на монотонных участках; $\dot{\chi}_c$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования материала на участках стабилизированного циклического деформирования без смещения центра поверхности a_e ; $\dot{\chi}_{\xi}$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования материала на участках циклического деформирования со смещением центра поверхности a_e (нестабилизированные участки траектории циклического деформирования).

Первый член уравнения (2.3) описывает изотропное упрочнение в результате монотонного пластического деформирования, второй член – циклическое упрочнение (разупрочнение) материала на стабилизированных участках циклического деформирования, третий член – циклическое разупрочнение (разупрочнение) материала при нестабилизированном циклическом деформировании, четвертый – изменение радиуса поверхности пластического нагружения при изменении температуры. Уравнение (2.4) описывает локальную анизотропию пластического упрочнения в зависимости от параметра непропорциональности нагружения A .

Эволюция тензора микронапряжений ρ_{ij} принимается в виде:

$$\dot{\rho}_{ij} = f(\chi) (\dot{\rho}_{ij}^m + \dot{\rho}_{ij}^p + \dot{\rho}_{ij}^r), \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt \quad (2.8)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^m = g_1^m \dot{e}_{ij}^p - g_2^m \rho_{ij}^m \dot{\chi} + g_T^m \rho_{ij}^m \dot{T}$$

$$\dot{\rho}_{ij}^p = g_1^p \dot{e}_{ij}^p - g_2^p \rho_{ij}^p \dot{\chi} + g_T^p \rho_{ij}^p \dot{T}$$

$$\dot{\rho}_{ij}^r = g_1^r \dot{e}_{ij}^p - g_2^r \left(\frac{\rho_{\min}^r - \rho_u^r}{\rho_u^r} \right) \rho_{ij}^r \dot{\chi} \cos \gamma + g_T^r \rho_{ij}^r \dot{T}$$

$$\cos \gamma = \begin{cases} \left| \frac{\dot{\rho}_{ij}^r}{(\dot{\rho}_{ij}^r)^{1/2} (\rho_{ij}^r)^{1/2}} \right|, & \cos \gamma < 0 \\ 0, & \cos \gamma > 0 \end{cases}, \quad \rho_u^r = (\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r)^{1/2}$$

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

$$f(\chi) = f(\chi_m) + f(\chi_c) + f(\chi_\xi)$$

$$f(\chi_{m,c,\xi}) = 1 + k_1^{m,c,\xi} (1 - e^{-k_2^{m,c,\xi} \chi_{m,c,\xi}})$$

где $g_1^{m,p,r}$, $g_2^{m,p,r}$, $k_1^{m,c,\xi}$, $k_2^{m,c,\xi}$ – материальные параметры, определяющиеся экспериментальным путем.

В формуле (2.8) первый член, указанный в скобках описывает эволюцию ρ_{ij} , связанного с образованием и эволюцией микропластических деформаций; второй – с образованием макроскопических пластических деформаций; третий – при односторонне накапливаемых пластических деформациях ξ_{ij} .

Зависимость (2.8) 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).

Функция $f(\chi)$ описывает изменение ρ_{ij} в случае зависимости параметров $g_1^{m,p,r}$, $g_2^{m,p,r}$ от длины пути пластического деформирования χ при монотонном, циклическом стабилизированном и нестабилизированном деформировании и связанная с физическими механизмами протекающими в процессе пластического нагружения, изменяющими фазовый состав конструкционного материала, дислокационная плотность и др.

Тензор скоростей пластических \dot{e}_{ij}^p деформаций определяется на основе ассоциированного с поверхностью активного нагружения закона течения:

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda_p S_{ij}$$

Влияние накопленной поврежденности учитывается через эффективные значения гидростатической и девиаторной части тензора напряжений. Эффективные значения компонент тензора напряжений определяются через эффективные значения модулей упругости [7] с учетом влияния на них величины накопленной поврежденности ω :

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

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

$$\tilde{\rho}_{ij}^{(n)} = F_1(\omega) \rho_{ij}^{(n)}, \quad n = m, p, r$$

где $F_{1,2}(\omega)$ – функции Мак-Кензи [7].

2.2. Уравнения накопления повреждений при малоцикловой и многоцикловой усталости. Уравнения накопления повреждений базируются на связи величины поврежденности с макроскопическими параметрами, которые могут быть экспериментально определены. Наиболее физически обоснованным и апробированным является энергетический подход [7, 8, 10, 18] при определении ресурсных характеристик поликристаллических

тел. Новожиловым В.В. установлена зависимость рассеянной энергии, затраченной на образование дефектов при малоцикловом нагружении, с работой тензора микронапряжений ρ_{ij} на пластических деформациях e_{ij}^p

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

Ресурсные характеристики при МнЦУ определяются с использованием подхода [13], основанного на энергетическом критерии, который записывается следующим выражением:

$$\sum_{i=1}^{N_p} \left[\Delta W_i - \Delta W_R \left(\frac{\Delta W_i}{\Delta W_R} \right)^\alpha \right] = \Delta W_o = \text{const} \quad (2.9)$$

где ΔW_o – опасная часть рассеянной энергии за цикл нагружения, коррелирующей с энергией затраченной 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 (2.9) для одного цикла нагружения в следующем виде:

$$\Delta W_o = \Delta W_i - \Delta W_R \left(\frac{\Delta W_i}{\Delta W_R} \right)^\alpha = \Delta W_i - \Delta W_H \quad (2.10)$$

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

В работе [11] Коротких Ю.Г. конкретизировал соотношение (2.10) на случай регулярного циклического нагружения в виде:

$$\Delta W_e^{on} = \Delta W_e [1 - f(\gamma)], \quad \gamma = \sigma_u / \sigma_u^R \quad (2.11)$$

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

На основе (2.9) и (2.11), выражение для опасной энергии за один цикл нагружения представим в следующем виде:

$$\Delta W_o = \Delta W_i [1 - f(\gamma)]$$

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

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

$$\gamma = \frac{\tilde{\sigma}_u^*}{\tilde{\sigma}_{hcf}^*}, \quad \tilde{\sigma}_u^* = [(\sigma_{ij}^i - \rho_{ij}^r)(\sigma_{ij}^i - \rho_{ij}^r)]^{1/2} \quad (2.12)$$

$$\tilde{\sigma}_{hcf} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{hcf} + \int_0^t \dot{C}_{pl}^c dt, \quad \dot{C}_{pl}^c = a_c (Q_{s\chi} - C_{pl}) \dot{\chi}_c + a_\xi (Q_{s\xi} - C_{pl}) \dot{\chi}_\xi + q_T \dot{T}$$

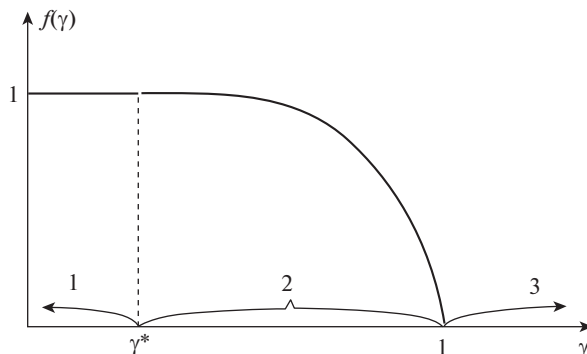


Рис. 2. Графическое представление функции $f(\gamma)$.

В выражении (2.12) $\tilde{\sigma}_u^*$ – нормированная интенсивность девиатора тензора напряжений; $\tilde{\sigma}_{hcf}$ – 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), σ_{hcf} – константа материала.

Для определения ресурсных характеристик поликристаллических металлов и их сплавов при деградации материала по механизмам МЦУ и МнЦУ в качестве энергии повреждения, принимается соотношение:

$$\Delta W_o = \sum_{i=1}^{N_f} \Delta W_i [1 - f(\gamma)]$$

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

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

На рис. 2 приведено графическое представление функции $f(\gamma)$ (1 – область гигациклового усталости, 2 – область многоциклового усталости, 3 – область малоциклового усталости).

В задачах оценки ресурсных характеристик необходимо учитывать влияние многоосности нагружения, наличие которой существенным образом снижает ресурс за счет как увеличения действующих компонент тензора деформаций и напряжений при пропорциональном нагружении так и за счет вращения главных площадок тензоров напряжений и деформаций при непропорциональном нагружении.

Многочисленные исследования влияния многоосности нагружения при различных видах напряженных состояний таких как двухосное растяжение–сжатие, трехосное растяжение и др. позволяют сделать вывод, что на ресурс оказывает существенное влияние “объемность” напряженного состояния $\beta = \sigma / \sigma_u$, где σ – гидростатическая компонента тензора напряжений, σ_u – интенсивность тензора напряжений.

Учет влияния “объемности” напряженного состояния на скорость роста поврежденности $\dot{\omega}$ производится за счет введения в уравнение скорости накопления повреждений функции $f_1(\beta)$, которая увеличивает скорость накопления повреждений $\dot{\omega}$ при нагружениях с $\beta \rightarrow +\infty$ и уменьшает скорость при $\beta \rightarrow -\infty$. При нагружениях с $\beta \rightarrow -\infty$ в некоторых поликристаллических металлах и сплавах возможно частичное уменьшение накопленной поврежденности (эффект “залечивания”). При нагружениях с $\beta = 0$ (чистый сдвиг) функция $f_1(\beta) = 1$.

В условиях непропорционального нагружения, при котором направляющие тензора напряжений и деформаций не соосны реализуемая траектория деформирования существенным образом влияет на кинетику напряженно-деформированного состояния и на ресурсные характеристики конструкционного материала.

Учитывая рассмотренные эффекты, влияющие на ресурсные характеристики, уравнение для скорости накопления усталостных повреждений в условиях малоциклового и многоциклового нагружения можно представить в виде:

$$\dot{\omega}_p = f_1(\beta) f_2(\omega_p) f_3(W_p) \dot{W}_p \quad (2.13)$$

В (2.13) введены следующие обозначения для функций:

$f_1(\beta)$ – учет влияния “объемности” напряженного состояния;

$f_2(\omega_p)$ – учет влияния накопленного уровня поврежденности на скорость накопления повреждений;

$f_3(W_p)$ – учет текущего относительного уровня рассеянной энергии, идущей на образование микродефектов.

$$f_1(\beta) = \exp(k_p \beta)$$

$$f_2(\omega_p) = \begin{cases} 0, & W_p \leq W_{pa} \\ c \omega_p^{-1/3} (1 - \omega_p)^{-2/3}, & W_p > W_{pa} \end{cases}$$

$$f_3(W_p) = \frac{W_p - W_{pa}}{W_{pf} - W_{pa}}$$

где c – константа интегрирования ($c \cong 0.806$).

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

2.3. Критерий прочности поврежденного материала. В качестве критерия прочности поврежденного материала принимается достижение накопленной поврежденности ω критического значения $\omega_f \leq 1$.

$$\omega = \omega_f \leq 1$$

3. Численные результаты. В работе [25] приведены результаты экспериментальных исследований циклического неупругого деформирования и закономерностей усталостного разрушения при действии одночастотного и двухчастотного нагружения для сталей 20 и 08X18H12T. Исследования усталостного разрушения проводили на испытательной машине МИР-СТ при симметричном и несимметричном нагружении в условиях одноосного растяжения–сжатия лабораторных образцов.

Испытывались цилиндрические гладкие образцы широко используемых конструкционных сталей: углеродистой стали 20 в состоянии поставки и стали аустенитного класса 08X18H12T(1) – в состоянии поставки и 08X18H12T(2) – после эксплуатационной наработки.

Таблица 1. 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_{pl}^o (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
σ_{hcf} , МПа	220	240	280
γ^*	0.8182	0.8400	0.7473
n	1.55	3.1	1.05

Каждый из указанных конструкционных материалов испытывали при следующих режимах нагружения: циклическое нагружение с частотой 34 Гц при симметричном цикле; циклическое нагружение с частотой 34 Гц с асимметрией в цикле, среднее напряжение $\sigma_m = 50$ МПа; циклическое нагружение с частотой 0.082 Гц с асимметрией в цикле, среднее напряжение $\sigma_m = 50$ МПа; циклическое нагружение реализуемое за счет изменения среднего напряжения в цикле σ_m в пределах от 0 до 100 МПа с частотой 0.082 Гц при циклическом нагружении с частотой 34 Гц (двухчастотное нагружение).

Результатом экспериментальных исследований явились кривые усталости для сталей 20 и 08X18H12T при указанных режимах нагружения.

В таблицах 1–3 для исследуемых сталей приведены физико-механические характеристики и материальные параметры МПС.

Значение модуля монотонного изотропного упрочнения q_1 и q_2 от длины траектории пластического деформирования χ для сталей аустенитного класса 08X18H12T(1) и 08X18H12T(2) приняты равными нулю.

На рис. 3–4 приведены расчетные кривые одноосного растяжения для сталей 2008X18H12T(1), 08X18H12T(2) и стали 20.

На рис. 5–7 приведено сравнение результатов расчетных и экспериментальных кривых усталости для сталей 08X18H12T(1), 08X18H12T(2), стали 20 соответственно, а также приведены расчетные кривые полной рассеянной энергии W , затраченной на пластическое деформирование и “опасной” части полной энергии W_o , коррелирующей

Таблица 2. Значение модуля монотонного изотропного упрочнения q_1 (МПа) от длины траектории пластического деформирования $\chi_{\text{мон}}$ 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

Таблица 3. Значение модуля циклического изотропного упрочнения $Q_{1\xi}$ (МПа) от длины траектории пластического деформирования a_{emax} 08X18H12T (1) ($Q_{2\xi} = 0$ для всех рассмотренных сталей)

Сталь 08X18H12T(1)							
a_{emax}	0	0.00015	0.000162	0.000165	0.000192	0.000248	0.000350
$Q_{1\xi}$, МПа	25	30	39	54	78	84	85
Сталь 08X18H12T(1)							
a_{emax}	0	0.00024	0.000266	0.000284	0.000331	0.00035	0.0004
$Q_{1\xi}$, МПа	25	32	43	61	77	82	90
Сталь 20							
a_{emax}	0	0.0004	0.000451	0.000508	0.000591	0.00075	0.0001
$Q_{1\xi}$, МПа	30	52	55	65	70	74	78

щей с энергией, затраченной на образование микродефектов в зависимости от числа циклов нагружения. На рис. 5,а, 6,а и 7,а представлены зависимости амплитуды напряжения от числа циклов, пунктирными линиями отмечены осредненные опытные данные, черными маркерами – результаты расчетов по предложенной модели МПС, а черными крестиками – экспериментальные точки. Из сравнения экспериментальных и расчетных кривых усталости (рис. 5,а, 6,а и 7,а) видно, что расчеты по модели МПС качественно и количественно совпадают с опытными данными. Численные данные по зависимостям рассеянной энергии от числа циклов (рис. 5,б – $\sigma_{11}^a = 300$ МПа, 5,с – $\sigma_{11}^a = 200$ МПа, 5,д – $\sigma_{11}^a = 190$ МПа, 6,б – $\sigma_{11}^a = 300$ МПа, 6,с – $\sigma_{11}^a = 230$ МПа,

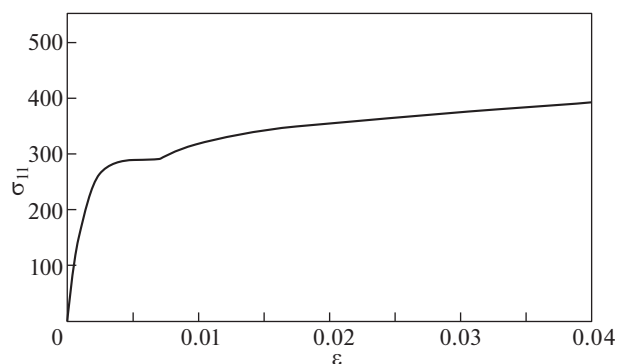


Рис. 3. Расчетная диаграмма растяжения для стали 20.

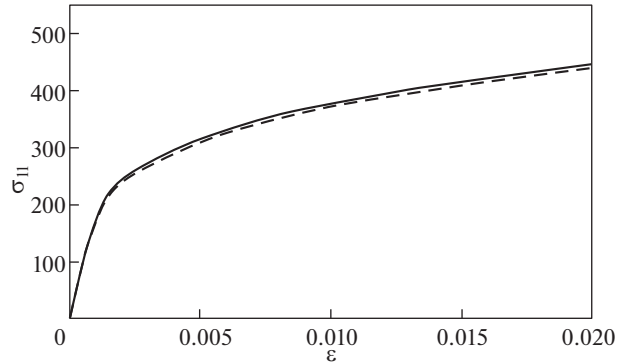


Рис. 4. Расчетные диаграммы растяжения сталей: — 2008X18H12T(1), - - - - 08X18H12T(2).

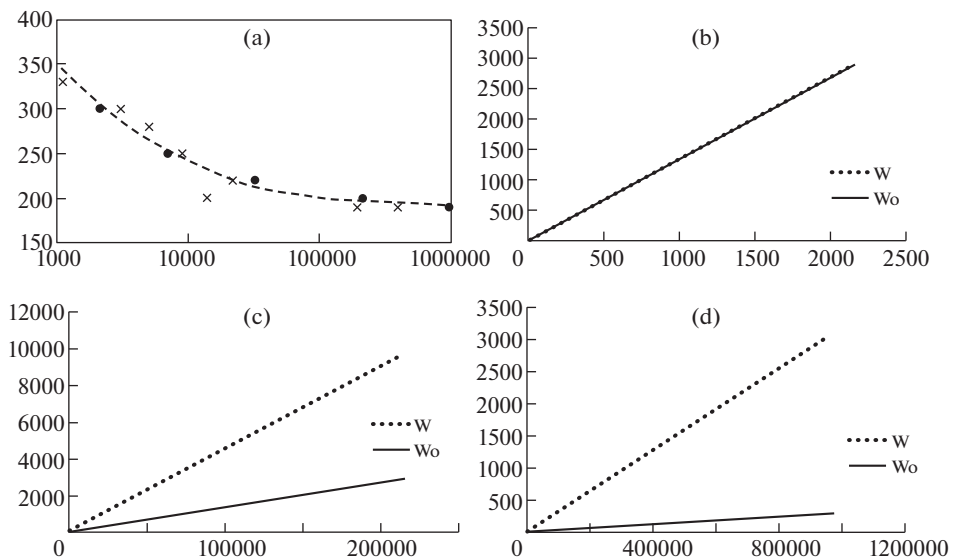


Рис. 5. Кривая усталости для стали 08X18H12T(1) при одночастотном нагружении (а).

6,d – $\sigma_{11}^a = 215$ МПа, 7,b – $\sigma_{11}^a = 330$ МПа, 7,c – $\sigma_{11}^a = 240$ МПа, 7,d – $\sigma_{11}^a = 215$ МПа) показывают, что в области МЦУ кривые полной рассеянной энергии $W(N)$ и ее “опасной части” $W_0(N)$ совпадают, но по мере уменьшения амплитуды нагружения данные кривые расходятся и тем больше, чем меньше амплитуда нагружения. Данный эффект связан с тем, что у “неопасной” части рассеянной полной энергии W_n наблюдается незначительная амплитудная зависимость только в области МЦУ, тогда как при МнЦУ амплитудная зависимость W_n вносит значительный вклад в полную рассеянную [13, 16].

На рис. 8–10 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных кривых усталости при двухчастотном нагружении для сталей 08X18H12T(1), 08X18H12T(2) и стали 20 в циклах высокой частоты. На рис. 11–13 приведены резуль-

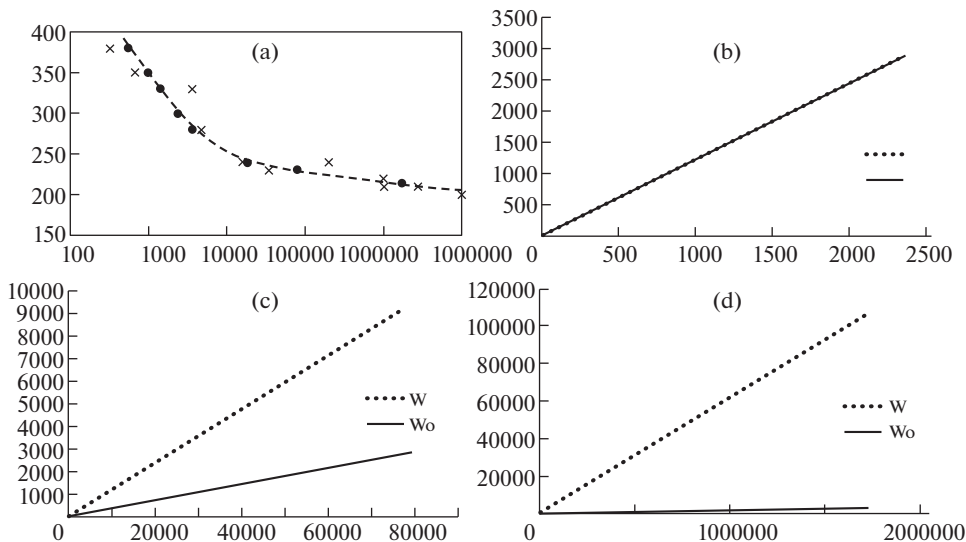


Рис. 6. Кривая усталости для стали 08X18H12T(2) при одночастотном нагружении (а).

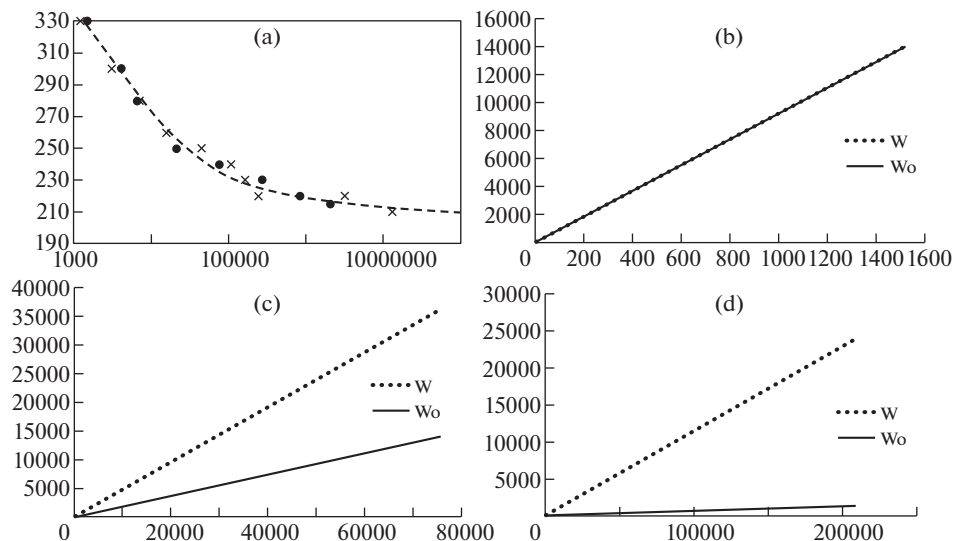


Рис. 7. Кривая усталости для стали 20 при одночастотном нагружении (а).

таты сравнения расчетных и экспериментальных кривых усталости при двухчастотном нагружении для сталей 08X18H12T(1), 08X18H12T(2) и стали 20 в циклах низкой частоты. Здесь пунктирными линиями отмечены расчетные данные при одночастотном нагружении, сплошной черной линией отмечены расчетные данные при двухчастотном нагружении, а черными маркерами – экспериментальные результаты при двухчастотном нагружении. Из представленных рисунков видно, что расчетные зна-

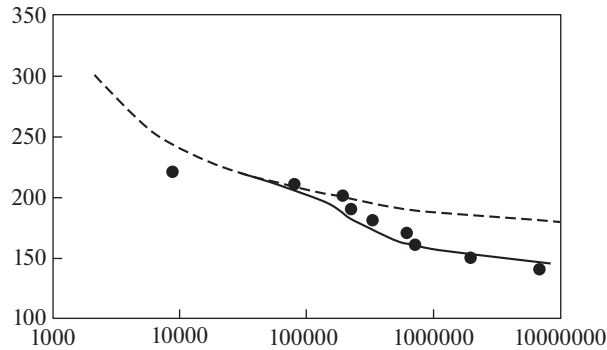


Рис. 8. Кривая усталости для стали 08X18H12T(1) при двухчастотном нагружении в циклах высокой частоты.

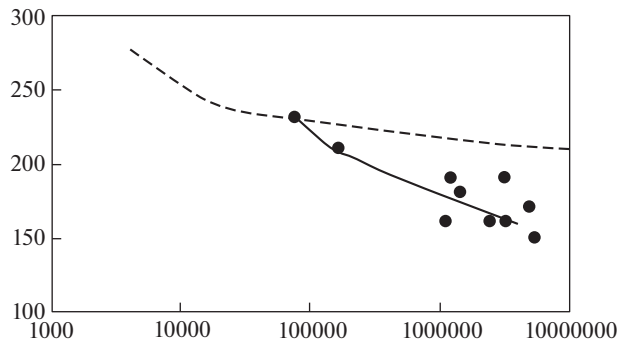


Рис. 9. Кривая усталости для стали 08X18H12T(2) при двухчастотном нагружении в циклах высокой частоты.

чения по математической модели МПС качественно и количественно совпадают с экспериментальными результатами.

На рис. 14–16 приведено сравнение расчетных стабилизированных петель гистерезиса для одночастотного (пунктирная линия) и двухчастотного нагружения (сплошная линия), из которого виден эффект роста размаха циклической пластической де-

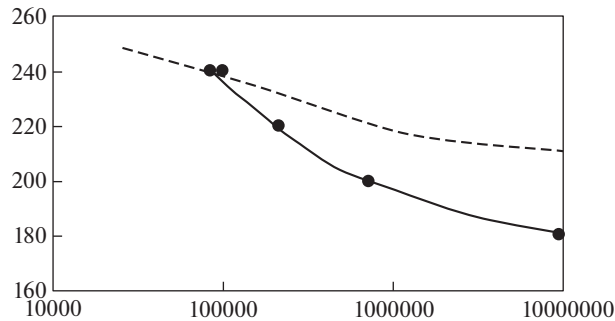


Рис. 10. Кривая усталости для стали 20 при двухчастотном нагружении в циклах высокой частоты.

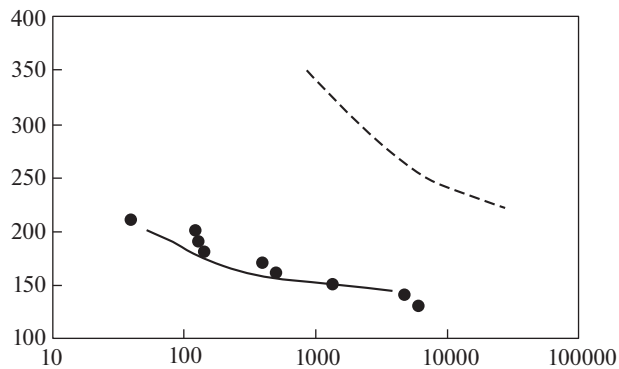


Рис. 11. Кривая усталости для стали 08X18N12Т(1) при двухчастотном нагружении в циклах низкой частоты.

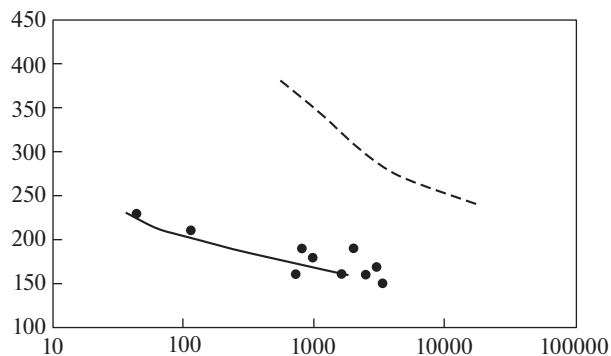


Рис. 12. Кривая усталости для стали 08X18N12Т(2) при двухчастотном нагружении в циклах низкой частоты.

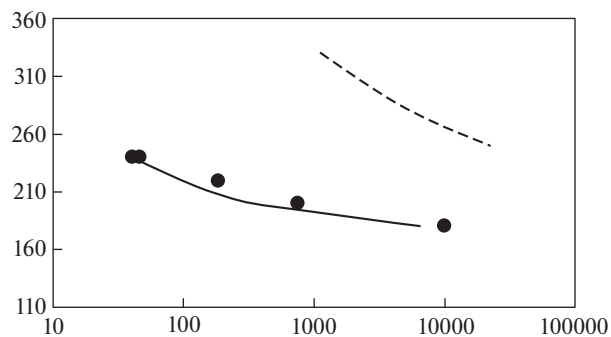


Рис. 13. Кривая усталости для стали 20 при двухчастотном нагружении в циклах низкой частоты.

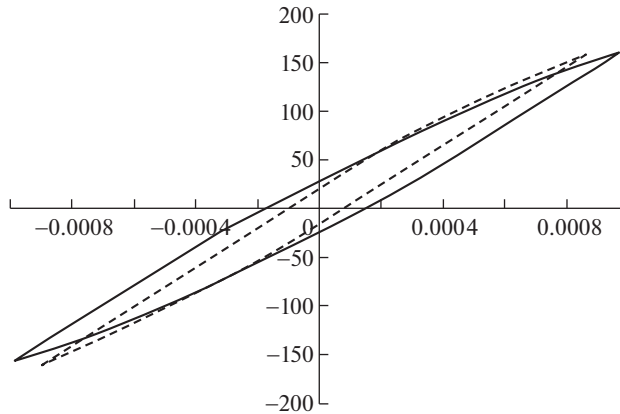


Рис. 14. Сравнение петель пластического гистерезиса при одночастотном и двухчастотном нагружении для стали 08X18N12T(1).

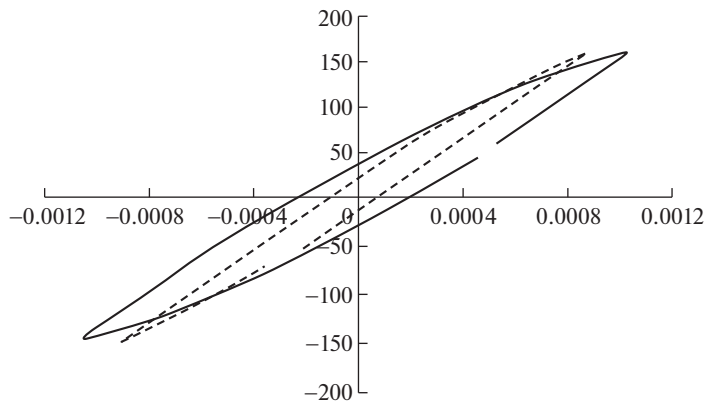


Рис. 15. Сравнение петель пластического гистерезиса при одночастотном и двухчастотном нагружении для стали 08X18N12T(2).

формации при двухчастотной форме цикла в сравнении с одночастотным нагружением при эквивалентной величине амплитуды напряжений, что связано со снижением сопротивления деформированию материалов (для лучшей визуализации петли нормированы к началу координатной сетки).

4. Заключение. Развита математическая модель МПС, описывающая процессы деформирования и накопления повреждений при усталостном нагружении, основанная на энергетическом подходе и единой форме представления процесса накопления повреждений при малоцикловой и многоцикловой усталости. Для математической модели определены параметры и скалярные функции, входящие в определяющие соотношения математической модели МПС. В рамках оценки достоверности развитой математической модели механики поврежденной среды проведены численные исследования процессов усталостного разрушения конструкционных материалов – сталей 20 и 08X18N12T в условиях одночастотного и двухчастотного нагружения. Результаты оценки достоверности

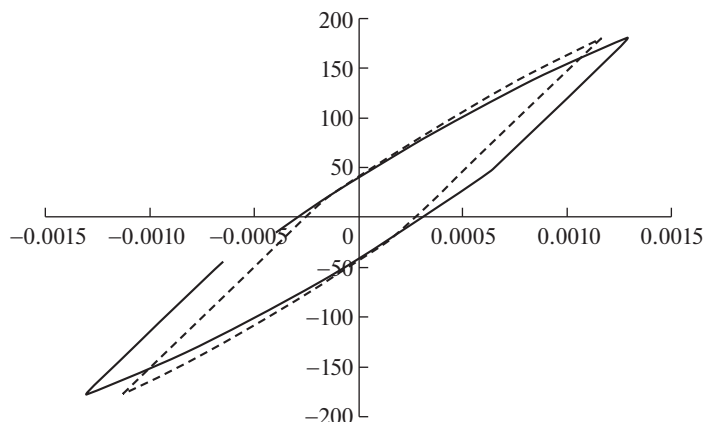


Рис. 16. Сравнение петель пластического гистерезиса при одночастотном и двухчастотном нагружении для стали 20.

показали, что развитая модель с высокой степенью точности описывает процессы малоциклового и многоциклового усталости.

Благодарности. Численные исследования стали 08X18H12T выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 0729-2020-0054). Численные исследования стали 20 выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00450).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение. М.: Мир, 1984. 624 с.
2. Троценко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоциклоном нагружении. Киев: Наук. думка, 1981. 343 с.
3. Банников М.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Исследование стадийности разрушения титановых сплавов в режиме много- и гигацикловой усталости на основе морфологии поверхности разрушения // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 3. С. 15–24. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.3.02>
4. Терентьев В.Ф. Механизм зарождения усталостных трещин в высокопрочных сталях при гигацикловой усталости // XIII International Colloquium “Mechanical fatigue of metals”. Plenary papers. Ternopil, Ukraine: TDTU, 2006. С. 135–140.
5. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
6. Волков И.А., Игумнов Л.А. Введение в континуальную механику поврежденной среды. М.: Физматлит, 2017. 304 с.
7. 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. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2019-81-1-63-76>
8. 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 // Пробле-

- мы прочности и пластичности. 2016. Т. 78. № 2. С. 188–207.
<https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-2-188-207>
9. *Chaboche J.-L., Kanouté P., Azzouz F.* Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions // *Int. J. Plasticity*. 2012. V. 35. P. 44–66.
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.01.010>
 10. *Волков И.А., Коротких Ю.Г.* Моделирование процессов усталостной долговечности материалов и конструкций при малоцикловом нагружении // *Изв. РАН. МТТ*. 2014. № 3. С. 66–78.
 11. *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. Т. 72. С. 28–35.
<https://doi.org/10.32326/1814-9146-2010-72-1-29-35>
 12. *Бондарь В.С., Данишин В.В., Кондратенко А.А.* Вариант теории термовязкопластичности // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2016. № 1. С. 39–56.
<https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.1.03>
 13. *Троценко В.Т.* Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщение 3. Деформационные энергетические критерии // *Проблемы прочности*. 2006. № 1. С. 5–31.
 14. *Гаденин М.М.* Исследование повреждаемости и долговечности конструкций при одно- и двухчастотных режимах нагружения на основе деформационных и энергетических подходов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. № 83 (6). С. 44–51.
 15. *Гаденин М.М.* Влияние формы цикла нагружения на сопротивление циклическому деформированию и разрушению конструкционных материалов // *Вестник научно-технического развития*. 2010. № 9 (37). С. 15–19.
 16. *Хамаза Л.А., Коваленко В.А.* Сопротивление металлов усталостному разрушению и деформированию при двухчастотном нагружении. Сообщение 2. Методика оценки циклической долговечности при двухчастотном нагружении // *Проблемы прочности*. 1989. № 10. С. 13–18.
 17. *Порошин В.Б., Дружинин П.С., Шахова С.А.* Методика оценки долговечности лопатки газовой турбины в условиях неупругого деформирования при двухчастотном нагружении // *II Международная научно-техническая конференция “Пром–Инжиниринг”*. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016 С. 36–43.
 18. *Бондарь В.С., Данишин В.В., Алхимов Д.А.* Анализ циклического деформирования и мало-многоциклового усталости в условиях одноосного напряженного состояния // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2016. № 4. С. 52–71.
<https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.4.04>
 19. *Мовчан Б.А., Фирстов С.А., Луговской Ю.Ф.* Структура, прочность и сопротивление усталости микрорекристаллических и микрослойных материалов. Киев: Наукова думка, 2016. 170 с.
 20. *Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М.* Металлофизика высокопрочных сплавов. М.: Металлургия, 1986. 312 с.
 21. *Пиккеринг Ф.Б.* Физическое металловедение и разработка сталей. М.: Металлургия, 1982. 184 с.
 22. *Хлыбов А.А., Углов А.Л.* Исследование накопления усталостных повреждений в образцах из стали 08X18H10T при малоциклового усталости // *Изв. высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 3. С. 185–190.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-3-185-190>
 23. *Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н.* Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / Отв. ред. *Ф.М. Митенков*. М.: Наука, 2009. 280 с.
 24. *Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л.* Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 183 с.
 25. *Хамаза Л.А., Коваленко В.А.* Сопротивление 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. 7–13.