

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-1-63-76

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ
ПРИ БЛОЧНЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ
МЯГКОГО МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ***

© 2019 г. **Волков И.А.^{1,2}, Игумнов Л.А.², Тарасов И.С.¹,
Шишулин Д.Н.³, Пичков С.Н.³, Маркова М.Т.¹**

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

²*Научно-исследовательский институт механики*

*Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

³*АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Российская Федерация*

pmptmvgavt@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.10.2018

Рассматриваются процессы пластического деформирования поликристаллических конструкционных сплавов при блочных нестационарных режимах мягкого малоциклового нагружения. В качестве определяющих соотношений пластичности используется модифицированная модель термопластичности Ю.Г. Коротких, относящаяся к классу теорий течения с трансляционно-изотропным упрочнением. Модификация модели Ю.Г. Коротких заключается в использовании другой формулировки эволюционных уравнений для смещения центра поверхности текучести (тензора микронапряжений) при блочных нестационарных режимах малоциклового нагружения. Такая модификация необходима для описания эффектов посадки петли пластического гистерезиса при жестких режимах нагружения (контролируемой деформации) и вышагивания (ratcheting) петли при мягком нагружении (контролируемые напряжения).

Определение материальных параметров и скалярных функций модели пластического деформирования, оценка ее достоверности и определение границ применимости проводились на основе экспериментальных исследований процесса деформирования лабораторных образцов из нержавеющей стали аустенитного (SS316L, SS304) и ферритного (20MnMoNi5-5) класса в условиях одноосного и многоосного, пропорционального и непропорционального режимов мягкого блочного циклического нагружения.

Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных показывает, что развитая модель пластичности качественно и с необходимой для инженерных расчетов точностью количественно описывает основные эффекты пластического деформирования (смещение петель пластического гистерезиса и

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

уменьшения размаха деформаций) при блочных нестационарных несимметричных режимах мягкого малоциклового нагружения.

Ключевые слова: модель пластичности, пластическая деформация, блочное несимметричное деформирование, мягкое нагружение, моделирование, численный и натурный эксперименты.

Введение

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

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

Уравнения состояния, построенные на базе монотонных процессов нагружения и не учитывающие особенности циклического деформирования при пропорциональных и непропорциональных нагружениях, могут привести к большим ошибкам в определении основных параметров напряженно-деформированного состояния, используемых затем для оценки ресурсных характеристик материала. Формулировка достоверных определяющих соотношений термопластичности для указанных процессов требует, прежде всего, экспериментальных исследований эффектов циклического поведения конструкционных материалов при пропорциональных и непропорциональных нагружениях [11–14].

Известен ряд направлений математической теории пластичности для описания процессов неупругого деформирования при малоцикловых режимах нагружения.

Наибольшее распространение как у нас в стране, так и за рубежом получили различные варианты дифференциальных теорий пластичности, относящиеся к классу теорий течения с трансляционно-изотропным упрочнением. Различия вариантов теорий заключаются в основном в разных формулировках эволюционных уравнений для радиуса поверхности текучести и для смещения центра поверхности (тензора микронапряжений) [11–14]. Достоверность применения этих моделей достаточно хорошо изучена при исследовании жестких циклических нагружений на широком спектре конструкционных сплавов и при использовании различных программ экспериментальных исследований (см. [11–13] и имеющиеся там ссылки). Однако для исследования процессов деформирования при блочных несимметричных режимах мягкого малоциклового нагружения возможности применения этих моделей в настоящее время изучены недостаточно [15–18]. Так, в статье [15] отмечено, что варианты моделей, предложенных в [12, 19], не позволяют достоверно описать качественные закономерности смещения и изменения ширины петли пластического гистерезиса в условиях мягких циклических нагружений. В [15] показано, что при таких видах нагружений модели [13, 14] качественно описывают закономерности смещения петли пластического гистерезиса, однако количественная информация о возможности описания кинетики ширины петли, которая является необходимой для определения энергии, идущей на разрушение материала, отсутствует.

В работах Ю.Г. Коротких [11, 12] развита математическая модель термопластичности, описывающая процессы сложного пластического деформирования в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при монотонных и циклических, пропорциональных и непропорциональных режимах термомеханического нагружения. В [20] предложена модификация этой модели для описания посадки петли пластического гистерезиса в нержавеющей стали (12X18H10T, 12X18H9) при блочных несимметричных режимах жесткого малоциклового нагружения. В настоящей статье эта модель используется для описания эффекта вышагивания (ratcheting) петли пластического гистерезиса при одноосных и многоосных, пропорциональных и непропорциональных режимах мягкого циклического нагружения. Полученные численные результаты сравниваются с данными натурных экспериментов и численными результатами, полученными другими авторами [15–18, 21].

1. Определяющие соотношения механики поврежденной среды

Определяющие соотношения пластичности, предложенные Ю.Г. Коротких [11, 12] и развитые в работах его учеников [20], базируются на следующих основных положениях:

- компоненты тензоров деформаций e_{ij} и скоростей деформаций \dot{e}_{ij} включают в себя упругие e_{ij}^e, \dot{e}_{ij}^e и пластические e_{ij}^p, \dot{e}_{ij}^p , то есть обратимые и необратимые, составляющие;

- начальная поверхность текучести для различных температур описывается поверхностью в форме Мизеса, эволюция изменения поверхности текучести описывается изменением ее радиуса C_p и перемещением ее центра ρ_{ij} ;

- изменение объема тела упруго;

- рассматриваются начально-изотропные среды; учитывается только анизотропия, вызванная процессами пластичности;

- рассматриваются процессы, характеризуемые малыми деформациями.

В упругой области связь между шаровыми σ, e и девиаторными σ'_{ij}, e'_{ij} составля-

ющими тензорами напряжений и деформаций и их скоростей устанавливается с помощью закона Гука:

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

где T – температура, T_0 – начальная температура, $K(T)$ – модуль объемного сжатия, $G(T)$ – модуль сдвига, $\alpha(T)$ – коэффициент линейного температурного расширения материала.

Для описания эффектов монотонного и циклического деформирования вводится поверхность текучести:

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

Для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве напряжений вводится поверхность циклической «памяти», уравнение которой имеет вид:

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

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

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

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

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

$$\chi_m = \int_0^t \dot{\chi} H(F_\rho) dt, \quad \chi = \int_0^t \dot{\chi} dt, \quad a = \frac{a_2 A \psi_3 + (1-A)a_1}{A \psi_3 + (1-A)}, \quad (5)$$

$$q_\chi = \frac{q_2 A \psi_1 + (1-A)q_1}{A \psi_1 + (1-A)}, \quad Q_s = \frac{Q_2 A \psi_2 + (1-A)Q_1}{A \psi_2 + (1-A)}, \quad 0 \leq \psi_i \leq 1, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6)$$

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

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

Здесь q_1, q_2, q_3 – экспериментально определяемые модули монотонного изотропного упрочнения; Q_1 и Q_2 – модули циклического изотропного упрочнения; a_1 и a_2 – постоянные, определяющие скорость процесса стационарирования петли гистерезиса циклического деформирования материала; Q_s – стационарное значение радиуса поверхности текучести при данных ρ_{\max} и T ; C_p^0 – начальное значение радиуса поверхности текучести [11, 12].

Постулируем, что эволюция внутренней переменной ρ_{ij} принимается в виде микронапряжений двух типов – ρ_{ij} и ρ_{ij}^* [20]:

$$\dot{\rho}_{ij} = f(\chi_m)[g_1 \dot{e}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \dot{\chi}] + g_5 \rho_{ij} \langle \dot{T} \rangle + \dot{\rho}_{ij}^*, \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad (7)$$

$$f(\chi_m) = 1 + k_1(1 - \exp(-k_2 \chi_m)), \quad \dot{\rho}_{ij}^* = g_3 \dot{e}_{ij}^p H(F_p) - g_4 \rho_{ij}^* \dot{\chi} \Gamma(F_p) \langle \cos \gamma \rangle, \quad (8)$$

$$\langle \cos \gamma \rangle = \frac{\dot{\rho}_{ij} \rho_{ij}^*}{(\dot{\rho}_{ij} \dot{\rho}_{ij})^{1/2} (\rho_{ij}^* \rho_{ij}^*)^{1/2}}, \quad (9)$$

где $g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, k_1$, и k_2 – экспериментально определяемые материальные параметры [20]. Здесь и далее для любой величины B , заключенной в угловые скобки $\langle \rangle$, выполняются условия

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

При несимметричном жестком и мягком циклических нагружениях за счет члена на $\dot{\rho}_{ij}^*$ уравнение (9) описывает процессы посадки и вышагивания (ratcheting) петли циклического пластического гистерезиса. При $g_3 = g_4 = g_5 = k_1 = 0$ получаем частный случай уравнения (9) – уравнение Армстронга – Фредерика – Кадашевича [15]:

$$\dot{\rho}_{ij} = g_1 \dot{e}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \dot{\chi}. \quad (10)$$

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

$$\dot{\rho}_{\max} = \frac{(\rho_{ij} \dot{\rho}_{ij}) H(F_p)}{(\rho_{mn} \rho_{mn})^{1/2}} - g_2 \rho_{\max} \dot{\chi} - g_5 \rho_{\max} \langle \dot{T} \rangle. \quad (11)$$

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

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda S_{ij}, \quad (12)$$

где λ – коэффициент пропорциональности, определяемый из условия прохождения новой поверхности текучести через конец вектора девиатора напряжений в конце этапа нагружения [11, 12].

2. Численные результаты

Оценка достоверности предложенного варианта модели термопластичности [12, 20] проводилась на результатах экспериментальных исследований лабораторных образцов из нержавеющей стали аустенитного (SS316L, SS304) [17, 18] и ферритного (20 MnMoNi5-5) [21] класса в условиях мягкого блочного несимметричного малоциклового нагружения.

Для стали 20MnMoNi5-5 нагружение состоит из двух блоков [21]:

– на первом блоке реализуется 200 циклов симметричного мягкого нагружения с амплитудой напряжений $\sigma_{11} = 460$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 0$;

– на втором блоке реализуется 75 циклов несимметричного нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 460$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 100$ МПа.

В таблице 1 для стали 20MnMoNi5-5 представлены основные физико-механические характеристики и материальные параметры модели пластического деформирования, используемые в расчетах.

Таблица 1

G , МПа	K , МПа	C_p° , МПа	g_1 , МПа	g_2	g_3 , МПа	g_4	k_1	k_2	a_1	a_2
83500	180333	326	110000	880	1250	7	0,136	50	0	0

Значения модуля монотонного изотропного упрочнения q_1 в зависимости от длины пути пластического деформирования χ_m для стали 20MnMoNi5-5 ($q_2 = 0$) даны в таблице 2.

Таблица 2

q_1 , МПа	-99672	-68330	-44956	-25269	-6440	969	3272	4273	4273	4273	4273
χ_m	0	0,0004	0,0009	0,0016	0,0028	0,0041	0,0056	0,008	0,015	0,02	0,035

На рис. 1 приведены расчетная и экспериментальная зависимости средней деформации e_{11}^{cp} цикла в процессе мягкого нагружения от числа циклов N . Здесь и далее маркерами отмечены опытные данные, а сплошными линиями – результаты расчета. Опытная и расчетная зависимости практически совпадают.

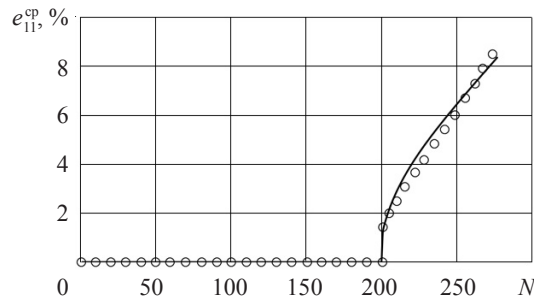


Рис. 1

На рис. 2 представлены кривые циклического деформирования, построенные по результатам численного моделирования экспериментальных процессов. Видно, что с увеличением числа циклов нагружения происходит смещение петли пластического гистерезиса в сторону положительных значений деформаций e_{11} и уменьшение размаха петли в пределах цикла.

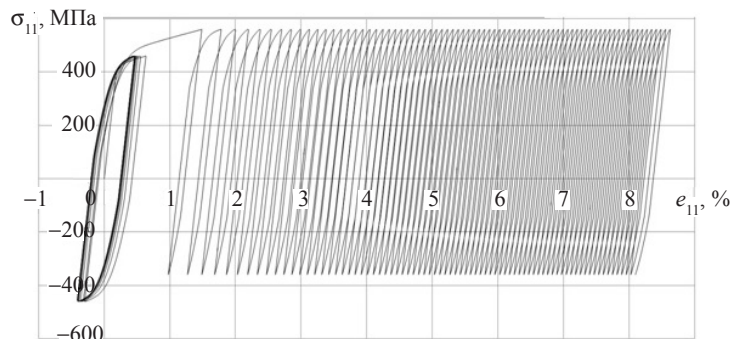


Рис. 2

В следующем примере представлены результаты исследований лабораторных образцов из стали SS316L при мягком блочном несимметричном циклическом нагружении, состоящем из четырех блоков [17]:

– на первом блоке реализуется 20 циклов несимметричного мягкого нагружения с амплитудой напряжений $\sigma_{11} = 195$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 52$ МПа;

– на втором блоке реализуется 20 циклов мягкого циклического нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 221$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 52$ МПа;

– на третьем блоке реализуется 20 циклов нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 247$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 52$ МПа;

– на четвертом блоке реализуется 20 циклов несимметричного мягкого нагружения с амплитудой напряжений $\sigma_{11} = 195$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 52$ МПа.

В таблице 3 для стали SS316L представлены основные физико-механические характеристики и материальные параметры модели пластического деформирования, используемые в расчетах.

Таблица 3

G , МПа	K , МПа	C_p^o , МПа	g_1 , МПа	g_2	g_3 , МПа	g_4	k_1	k_2	a_1	a_2
65384	141700	160	19850	450	660	10	0,1	50	50	0

Значения модуля монотонного изотропного упрочнения q_1 в зависимости от длины пути пластического деформирования χ_m для стали SS316L ($q_2 = 0$) показаны в таблице 4.

Таблица 4

q_1 , МПа	-10206	-3632	-2788	81,8	-338	-222	153	177	614	-132	0
χ_m	0	0,001	0,002	0,004	0,007	0,012	0,016	0,020	0,023	0,026	0,031

Значения модуля циклического упрочнения Q_1 в зависимости от величины максимального значения смещения центра поверхности текучести ρ_{max} для стали SS316L ($Q_2 = 0$) даны в таблице 5.

Таблица 5

Q_1 , МПа	160	207	207
ρ_{max} , МПа	0	10	50

На рис. 3 приведены расчетная и экспериментальная зависимости средней деформации от числа циклов нагружения, а на рис. 4 – кривые циклического деформирования, построенные по результатам расчета.

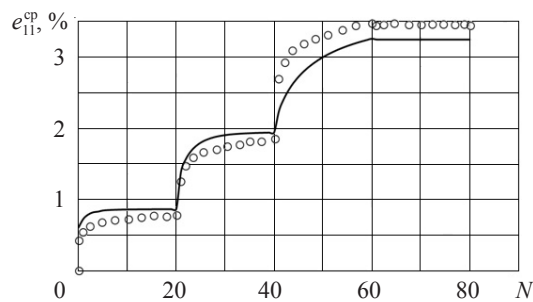


Рис. 3

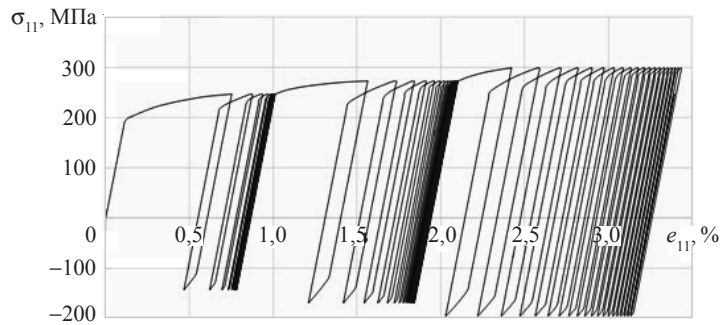


Рис. 4

Анализ полученных результатов, их сравнение с расчетными данными позволяют сделать вывод: несмотря на то, что история изменения средней деформации согласуется с опытными данными, моделируемые петли пластического гистерезиса имеют несколько больший размах, чем экспериментальные.

В третьем примере представлены результаты численного моделирования процессов деформирования образцов из стали SS304 при блочных несимметричных режимах мягкого циклического нагружения [18]:

- на первом блоке реализуется 50 циклов несимметричного мягкого нагружения с амплитудой напряжений $\sigma_{11} = 248$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 78$ МПа;
- на втором блоке реализуется 50 циклов несимметричного мягкого нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 248$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 117$ МПа;
- на третьем блоке реализуется 20 циклов нагружения с амплитудой напряжений $\sigma_{11} = 248$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 78$ МПа.

В таблице 6 представлены основные физико-механические характеристики и материальные параметры модели термопластичности для стали SS304, используемые в расчетах, $Q_c = 800$ МПа.

Таблица 6

G , МПа	K , МПа	C_p^o , МПа	g_1 , МПа	g_2	g_3 , МПа	g_4	k_1	k_2	a_1	a_2
65384	141700	228–249	22000	300	1000	10	0,68	50	15	50

Значения модуля монотонного изотропного упрочнения q_1 в зависимости от длины пути пластического деформирования χ_m для стали SS304 ($q_2 = 0$) показаны в таблице 7.

Таблица 7

q_1 , МПа	-13462	-8508	-8738	-6027	-2690	-1173	-118	-489	0	0
χ_m	0	0,001	0,002	0,003	0,005	0,007	0,01	0,015	0,02	0,03

Значения модуля циклического упрочнения Q_1 в зависимости от величины максимального значения смещения центра поверхности текучести ρ_{max} для стали SS304 ($Q_2 = 0$) даны в таблице 8.

Таблица 8

Q_1 , МПа	228–241	220–241	220–241
ρ_{max} , МПа	0	10	80

На рис. 5 показаны расчетная и экспериментальная зависимости изменения средней деформации от числа циклов нагружения, а на рис. 6 – кривые циклического деформирования, построенные по результатам расчета.

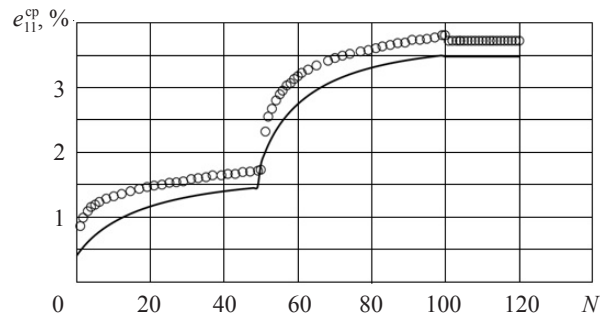


Рис. 5

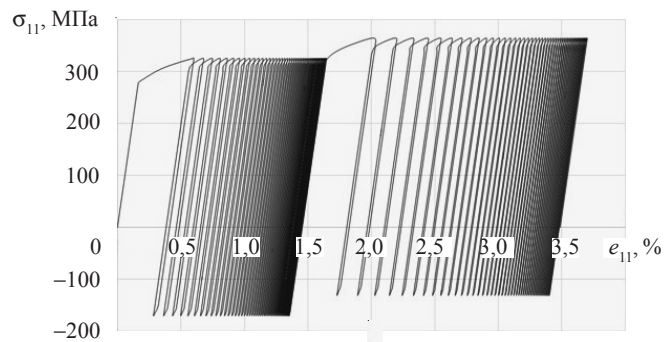


Рис. 6

Далее представлены результаты численного моделирования процессов деформирования лабораторных образцов из стали SS304 при многоосных пропорциональных (рис. 7а) и непропорциональных (рис. 7б) режимах мягкого блочного циклического нагружения.

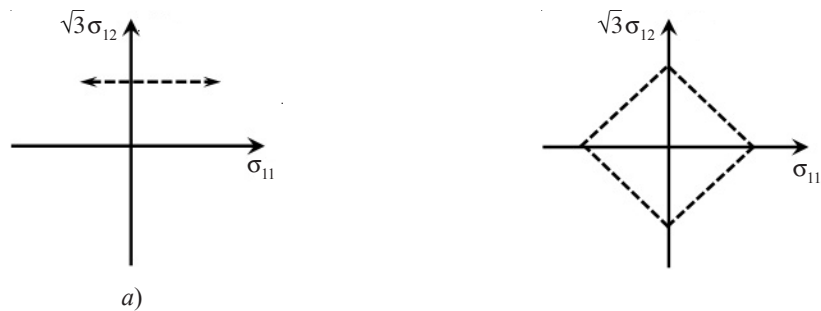


Рис. 7

Для истории нагружения, показанной на рис. 7а, изменение амплитуды напряжений σ_{11} в блоках при постоянном напряжении $\sqrt{3}\sigma_{12} = \text{const}$ проводилось в следующей последовательности:

– на первом блоке реализуется 50 циклов нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 248$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{\text{cp}} = 78$ МПа;

– на втором блоке реализуется 50 циклов нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 248$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 117$ МПа;

– на третьем блоке реализуется 50 циклов нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 248$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 78$ МПа.

На рис. 8 представлены расчетные и экспериментальные зависимости изменения средних деформаций (осевой и сдвиговой) от числа циклов нагружения, а на рис. 9 – расчетные траектории деформирования, построенные в пространстве деформаций.

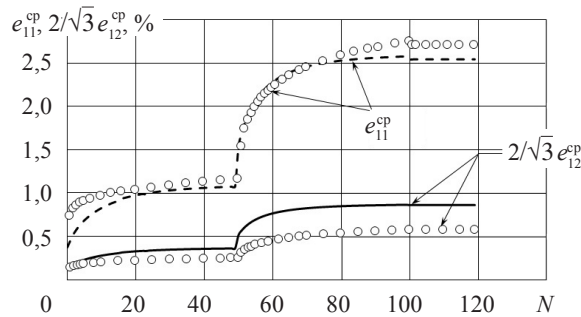


Рис. 8

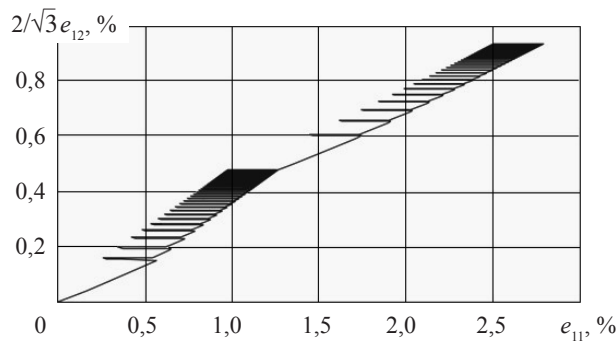


Рис. 9

Для истории циклического нагружения, представленной на рис. 7б, изменение амплитуды напряжений σ_{11} в блоках при изменении напряжения σ_{12} с амплитудой $248/\sqrt{3}$ МПа проводилось в последовательности:

– на первом блоке реализуется 50 циклов нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 248$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 78$ МПа;

– на втором блоке реализуется 50 циклов нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 248$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 117$ МПа;

– на третьем блоке реализуется 50 циклов нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 248$ МПа и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 78$ МПа.

На рис. 10 представлены расчетные и экспериментальные зависимости изменения средних деформаций (осевой и сдвиговой) от числа циклов нагружения, а на рис. 11 – расчетные траектории деформирования, построенные в пространстве деформаций.

Видно качественное и приемлемое для инженерных расчетов количественное соответствие опытных и модельных представлений для описания эффекта вышагивания петли пластического гистерезиса при одноосных и многоосных, пропорцио-

нальных и непропорциональных режимах мягкого циклического нагружения, что говорит о правильности моделирования процесса блочного нестационарного несимметричного циклического нагружения и определения материальных параметров и скалярных функций определяющих соотношений пластичности.

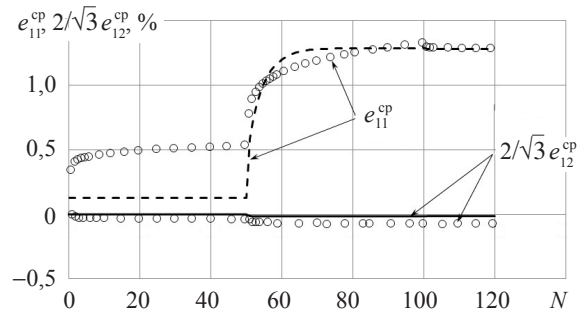


Рис. 10

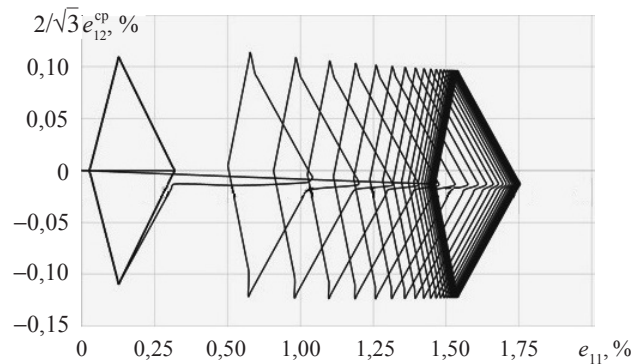


Рис. 11

Заключение

Для описания эффектов посадки петли циклического пластического гистерезиса при жестком (контроль по деформациям) и вышагивания петли при мягком (контроль по напряжениям) нестационарном несимметричном циклическом нагружении выполнена модификация модели термопластичности Ю.Г. Коротких в части использования другой формулировки эволюционных уравнений для смещения центра поверхности текучести (тензора микронапряжений). Путем сопоставления результатов численного моделирования экспериментальных процессов с опытными данными показано, что модифицированная модель термопластичности Ю.Г. Коротких достоверно описывает кинетику процесса пластического деформирования конструкционных материалов (металлов и их сплавов) при различных режимах малоциклового нагружения (мягких, жестких) с учетом асимметрии цикла.

Список литературы

1. Митенков Ф.М., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г. и др. *Методы обоснования ресурса ЯЭУ*. М.: Машиностроение, 2007. 445 с.
2. Лэмба Г.С., Сайдботтом О.М. Пластичность при циклическом нагружении по непропорциональным траекториям. *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1978. Т. 100. №1. С. 108–126.

3. Макдауэл Д.Л. Экспериментальное изучение структуры определяющих уравнений для непропорциональной циклической пластичности. *Теоретические основы инженерных расчетов* 1985. №4. С. 98–111.
4. Охаси И., Кавай М., Каито Т. Неупругое поведение стали 316 при многоосных непропорциональных циклических нагружениях при повышенной температуре. *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1985. Т. 107. №2. С. 6–15.
5. Tanaka E., Murakami S., Ooka M. Effects of plastic strain amplitudes on non-proportional cyclic plasticity. *Acta Mechanica*. 1985. Vol. 57. P. 167–182.
6. Tanaka E., Murakami S., Ooka M. Effects of strain path shapes on nonproportional cyclic plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1985. Vol. 33. No 6. P. 559–575.
7. Hassan T., Taleb L., Krishna S. Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models. *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. P. 1863–1889.
8. Huang Z.Y., Chaboche J.L., Wang Q.Y., Wagner D., Bathias C. Effect of dynamic strain aging on isotropic hardening in low cycle fatigue for carbon manganese steel. *Materials Science and Engineering*. 2014. A589. P. 34–40.
9. Jiang Y., Zhang J. Benchmark experiments and characteristic cyclic plasticity deformation. *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. P. 1481–1515.
10. Taleb L., Cailletaud G., Sa'i K. Experimental and numerical analysis about the cyclic behavior of the 304L and 316L stainless steels at 350 °C. *International Journal of Plasticity*. 2014. Vol. 61. P. 32–48.
11. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
12. Митенков Ф.М., Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. и др. *Прикладная теория пластичности*. М.: Физматлит, 2015. 284 с.
13. Бондарь В.С., Даншин В.В. *Пластичность. Пропорциональные и непропорциональные нагружения*. М.: Физматлит, 2008. 176 с.
14. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*. 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302.
15. Бондарь В.С., Адашев Д.Р., Петров В.К. Сравнительный анализ вариантов теорий пластичности при циклических нагружениях. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2017. №2. С. 23–44.
16. Горохов В.А. Развитие модели пластичности с комбинированным упрочнением для исследования процессов деформирования конструкционных материалов при различных режимах малоцикловых нагружений. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №2. С. 180–193.
17. Guozheng K., Qing G. Uniaxial ratcheting of SS316L stainless steel at high temperature: experiments and simulations. *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18)*. Beijing, China. 7–12 Aug. 2005. SMiRT18-F01-5. P. 1006–1014.
18. Guozheng K., Qing G., Lixun C., Yafang S. Experimental study on uniaxial and nonproportionally multiaxial ratcheting of SS304 stainless steel at room and high temperatures. *Nuclear Engineering and Design*. 2002. Vol. 216. Iss. 1–3. P. 13–26.
19. Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А. *Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ*. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 347 с.
20. Волков И.А., Игумнов Л.А., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н., Маркова М.Т. Моделирование усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при блочном несимметричном малоцикловом нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №1. С. 15–30.
21. Yu Wang. *Experimental and Numerical Evaluations of Viscoplastic Material Behavior and Multiaxial Ratcheting of Austenitic and Ferritic Materials: Wurde eines Doctor-Ingenieurs, Materialprufungsanstalt (MPA)*. Stuttgart: Universitat Stuttgart, 2014. 155 p.

References

1. 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).
2. Lamba H.S., Sidebottom O.M. Cyclic plasticity for nonproportional paths: Part 1. Cyclic hardening, 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.
3. 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.
4. Ohashi Y., Kawai M., Kaito T. Inelastic behavior of type 316 stainless steel under multiaxial nonproportional cyclic stressings at elevated temperature. *J. Eng. Mater. Technol.* 1985. Vol. 107. No 2. P. 101–109. DOI: 10.1115/1.3225781.
5. Tanaka E., Murakami S., Ooka M. Effects of plastic strain amplitudes on non-proportional cyclic plasticity. *Acta Mech.* 1985. Vol. 57. P. 167–182.
6. Tanaka E., Murakami S., Ooka M. Effects of strain path shapes on nonproportional cyclic plasticity. *J. Mech. Phys. Solids.* 1985. Vol. 33. No 6. P. 559–575.
7. Hassan T., Taleb L., Krishna S. Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models. *Int. J. Plasticity.* 2008. Vol. 24. P. 1863–1889.
8. Huang Z.Y., Chaboche J.L., Wang Q.Y., Wagner D., Bathias C. Effect of dynamic strain aging on isotropic hardening in low cycle fatigue for carbon manganese steel. *Mat. Sci. Eng.* 2014. A589. P. 34–40.
9. Jiang Y., Zhang J. Benchmark experiments and characteristic cyclic plasticity Deformation. *Int. J. of Plasticity.* 2008. Vol. 24. P. 1481–1515.
10. Taleb L., Cailletaud G., Sa'i K. Experimental and numerical analysis about the cyclic behavior of the 304L and 316L stainless steels at 350°C. *Int. J. of Plasticity.* 2014. Vol. 61. P. 32–48.
11. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami* [Equations of State Viscoelasticoplastic Environments with Injuries]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).
12. Mitenkov F.M., Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G. et al. *Prikladnaya teoriya plastichnosti*. [Applied Theory of Plasticity]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2015. 284 p. (In Russian).
13. Bondar V.S., Danshin V.V. *Plastichnost. Proportsionalnye i neproportsionalnye nagruzheniya* [Plasticity. Proportional and Non-proportional Loading]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 176 p. (In Russian).
14. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Int. J. of Plasticity.* 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302.
15. Bondar V.S., Abashev D.R., Petrov V.K. Sravnitelnyy analiz variantov teorii plastichnosti pri tsiklicheskiykh nagruzheniyakh [Comparative analysis of variants of plasticity theories under cyclic loading]. *Vestnik PNIPU Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2017. No 2. P. 23–44 (In Russian).
16. Gorokhov V.A. Razvitie modeli plastichnosti s kombinirovannym uprochneniem dlya issledovaniya protsessov deformirovaniya konstruktsionnykh materialov pri razlichnykh rezhimakh malotsiklovykh nagruzheniy [Developing a plasticity model with combined hardening for studying deformation processes in structural materials under various low-cycle loading modes]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2018. Vol. 80. No 2. P. 180–193. (In Russian).
17. Guozheng K., Qing G. Uniaxial ratcheting of SS316L stainless steel at high temperature: experiments and simulations. *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18)*. Beijing, China. 7–12 Aug. 2005. SMiRT18-F01-5. P. 1006–1014.
18. Guozheng K., Qing G., Lixun C., Yafang S. Experimental study on uniaxial and nonproportionally multiaxial ratcheting of SS304 stainless steel at room and high temperatures. *Nuclear Engineering and Design.* 2002. Vol. 216. Iss. 1–3. P. 13–26.

19. Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Gorokhov V.A. *Modelirovanie nelineynogo deformirovaniya i razrusheniya konstruktsiy v usloviyakh mnogofaktornykh vozdeystviy na osnove MKE [Modeling of Nonlinear Deformation and Fracture of Structures under Multi-factor Influences on the Basis of FEM]*. Nizhny Novgorod. UNN Publ. 2015. 347 p. (In Russian).

20. Volkov I.A., Igumnov L.A., Tarasov I.S., Shishulin D.N., Markova M.T. Modelirovanie ustalostnoy dolgovechnosti polikristallicheskikh konstruktsionnykh splavov pri blochnom nesimmetrichnom malotsiklovom nagruzhении [Modeling fatigue life of polycrystalline structural alloys under block-type nonsymmetrical low-cycle loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2018. Vol. 80. No 1. P. 15–30 (In Russian).

21. Yu Wang. *Experimental and Numerical Evaluations of Viscoplastic Material Behavior and Multiaxial Ratcheting of Austenitic and Ferritic Materials: Wurde eines Doctor-Ingenieurs, Materialprufungsanstalt (MPA)*. Stuttgart. Universitat Stuttgart. 2014. 155 p.

MODELING PLASTIC DEFORMATION OF POLYCRYSTALLINE STRUCTURAL ALLOYS UNDER BLOCK-TYPE NONSYMMETRICAL REGIMES OF SOFT LOW-CYCLE LOADING

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

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

²*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

³*JSC "OKBM Afrikantov", Nizhny Novgorod, Russian Federation*

Processes of plastic deformation of polycrystalline structural alloys under block-type nonstationary regimes of soft low-cycle loading are considered. Modified Korotkikh's thermal-plasticity model pertaining to the class of yield theories with translation-isotropic hardening is used as defining relations of plasticity. The modification of Korotkikh's model consists in using a different formulation of evolutionary equations for the displacement of the yield surface center (the micro-stress tensor), used for block-type nonstationary regimes of low-cycle loading for describing effects of setting under a hard loading regime (controlled strains) and ratcheting under a soft loading regime (controlled stresses) of the plastic hysteresis loop.

Determining the material parameters and scalar functions of the plastic deformation model, assessing its adequacy and scope of application was done based on the experimental studies of the deformation process of laboratory specimens made of stainless steels of the austenite (SS316L, SS304) and ferrite (20MnMoNi5-5) classes in the conditions of uniaxial and multiaxial, proportional and non-proportional regimes of soft block-type cyclic loading.

Comparison of the numerical results with the experimental data indicates that the developed plasticity model qualitatively and quantitatively, accurately enough for engineering purposes, describes the main effects of plastic deformation (displacements of the plastic hysteresis loops and decreasing strain amplitudes) under block-type nonstationary nonsymmetrical regimes of soft low-cycle loading.

Keywords: plasticity model, plastic deformation, block-type nonsymmetrical deformation, soft loading, modeling, numerical and full-scale experiments.