

УДК 539.374

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ТЕОРИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ МОНОТОННЫХ И ЦИКЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

© 2021 г. Д. Р. Абашев^а, В. С. Бондарь^{а,*}

^а *Московский политехнический университет, Москва, Россия*

**e-mail: v.s.bondar@mospolytech.ru*

Поступила в редакцию 01.11.2018 г.

После доработки 08.10.2019 г.

Принята к публикации 05.12.2019 г.

На основе анализа результатов экспериментальных исследований образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т при жестком (контролируемые деформации) процессе деформирования, включающем в себя последовательности монотонных и циклических режимов нагружения, выявлены некоторые особенности и различия процессов изотропного и анизотропного упрочнений при монотонных и циклических нагружениях. Для описания этих особенностей в рамках теории пластичности в пространстве тензора пластических деформаций вводится критерий смены направления пластического деформирования и поверхность памяти, позволившие разделить процессы монотонного и циклического деформирования. Для описания переходных процессов формулируются эволюционные уравнения для параметров изотропного и анизотропного упрочнений. Сравниваются расчетные и экспериментальные изменения напряженно-деформированных состояний по процессу монотонных и циклических нагружений.

Ключевые слова: монотонные и циклические нагружения, теория пластичности, поверхность памяти, базовый эксперимент, метод идентификации

DOI: 10.31857/S0572329921010025

Введение. Нестационарные и несимметричные процессы циклического деформирования состоят из последовательности монотонных и циклических режимов нагружения. Математическое моделирование таких процессов в условиях жесткого (контролируемые деформации) нагружения и особенно мягкого (контролируемые напряжения) нагружения представляют собой весьма сложную задачу. К тому же при реализации таких режимов возникают трудно описываемые процессы посадки и вышагивания (ratcheting) петли гистерезиса. Что же касается оценки и прогнозирования ресурса в условиях нестационарных и несимметричных циклических нагружений, то в этих случаях накопление повреждений необходимо определять по всему процессу деформирования, учитывая, что накопление повреждений существенно нелинейно.

Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагружениях строится, в основном, на вариантах теорий пластичности, относящихся к классу теорий пластического течения при комбинированном (изотропном и анизотропном) упрочнении, обзор и анализ которых содержатся в работах [1–12]. В настоящей работе математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений базируется на варианте теории пластичности [1, 9], который, как показано в работе [10], является наиболее адекватным

вариантом описания процессов деформирования и разрушения при циклических нагружениях по сравнению с моделями Коротких [2] и Шабоша [6–8].

Для выявления особенностей деформирования при нестационарном и несимметричном циклическом нагружении рассматривается жесткое нагружение в условиях растяжения–сжатия образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, которое представляет собой последовательность пяти этапов: циклическое, монотонное, циклическое, монотонное, циклическое вплоть до разрушения. Анализ переходных процессов от циклического к монотонному и от монотонного к циклическому показывает необходимость разделения процессов монотонного и циклического деформирования. Для этого в пространстве пластических деформаций вводится критерий смены направления пластического деформирования и поверхность памяти, разделяющая циклические и монотонные процессы деформирования. Далее в уравнения теории пластичности вводятся уравнения эволюции параметров изотропного и анизотропного упрочнений для монотонных и циклических режимов нагружения.

Разделение процессов монотонного и циклического деформирования имеет место и в модели Коротких [2–4], но только для описания эволюции изотропного упрочнения. Поверхность памяти в этой модели строится в пространстве девиатора микронапряжений с определением в процессе деформирования максимального значения интенсивности микронапряжений. В работах [2, 11] для описания эволюции анизотропного упрочнения в пространстве девиатора пластических деформаций вводится поверхность памяти с определением в процессе деформирования интенсивности максимальной амплитуды пластической деформации. Далее в работе [12] для описания эволюции анизотропного упрочнения используется такая же поверхность памяти, как и ранее для изотропного упрочнения. Все эти подходы [2, 11, 12] обладают одним существенным недостатком – достигнутый размер поверхности памяти имеет возможность в конце цикла и уменьшиться и увеличиться и это приводит к тому, что в конце каждого цикла возможно как монотонное, так и циклическое нагружение. К тому же согласно эволюционному уравнению для максимальной интенсивности микронапряжений при циклическом нагружении эта величина всегда уменьшается, хотя она должна оставаться постоянной на стабилизированном цикле. В заключение следует также сказать, что достаточного обоснования рассматриваемых подходов [2, 11, 12] в литературе нет.

С учетом выявленных особенностей монотонных и циклических нагружений для уточненных уравнений модифицированной теории пластичности определен базовый эксперимент и сформулирован метод идентификации материальных функций. Получены материальные функции нержавеющей стали 12Х18Н10Т при комнатной температуре. Приводится сравнение результатов расчетных и экспериментальных исследований нержавеющей стали 12Х18Н10Т при жестком нагружении, состоящем из последовательности монотонных и циклических режимов нагружения. Анализируется кинетика напряженно-деформированного состояния, рассматриваются изменения размаха и среднего напряжения цикла в процессе этапов циклических нагружений.

1. Основные уравнения теории пластичности. Рассматривается весьма простой вариант теории пластичности [9, 10], являющийся частичным вариантом теории неупругости [1]. Вариант теории пластичности относится к классу одноповерхностных теорий течения при комбинированном упрочнении. Область применимости варианта теории пластичности ограничивается малыми деформациями начально изотропных металлов при температурах, когда нет фазовых превращений, и скоростях деформаций, когда динамическими и реологическими эффектами можно пренебречь.

Далее приводится сводка основных уравнений варианта теории пластичности.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p \quad (1.1)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e = \frac{1+\nu}{E} \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \frac{\nu}{E} \text{tr}(\dot{\boldsymbol{\sigma}}) \mathbf{I} \quad (1.2)$$

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{3}{2}(\mathbf{s} - \mathbf{a}) : (\mathbf{s} - \mathbf{a}) - C^2 = 0 \quad (1.3)$$

$$\dot{C} = q_\varepsilon \dot{\varepsilon}_{u^*}^p, \quad \dot{\varepsilon}_{u^*}^p = \left(\frac{2}{3} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

$$\dot{\mathbf{a}} = \sum_{m=1}^M \dot{\mathbf{a}}^{(m)} \quad (1.5)$$

$$\dot{\mathbf{a}}^{(1)} = \frac{2}{3} g^{(1)} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p + g_a^{(1)} \mathbf{a}^{(1)} \dot{\varepsilon}_{u^*}^p \quad (1.6)$$

$$\dot{\mathbf{a}}^{(2)} = \frac{2}{3} g^{(2)} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p + g_a^{(2)} \mathbf{a}^{(2)} \dot{\varepsilon}_{u^*}^p \quad (1.7)$$

$$\dot{\mathbf{a}}^{(m)} = \frac{2}{3} g^{(m)} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p \quad (m = 3, \dots, M) \quad (1.8)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \lambda = \frac{3}{2} \frac{\mathbf{s}^*}{\sigma_u^*} \dot{\varepsilon}_{u^*}^p, \quad \mathbf{s}^* = \mathbf{s} - \mathbf{a}, \quad \sigma_u^* = \left(\frac{3}{2} \mathbf{s}^* : \mathbf{s}^* \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

$$\dot{\varepsilon}_{u^*}^p = \frac{1}{E_*} \frac{3}{2} \frac{\mathbf{s}^* : \dot{\boldsymbol{\sigma}}}{\sigma_u^*}, \quad E_* = q_\varepsilon \sum_{m=1}^M g^{(m)} + \sum_{m=1}^2 g_a^{(m)} a_u^{(m)*}, \quad a_u^{(m)*} = \frac{3}{2} \frac{\mathbf{s}^* : \mathbf{a}^{(m)}}{\sigma_u^*} \quad (1.10)$$

$$\dot{\varepsilon}_{u^*}^p = \frac{1}{E_* + 3G} 3G \frac{\mathbf{s}^* : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{\sigma_u^*}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.11)$$

$$\sigma_u^* < C \cup \dot{\varepsilon}_{u^*}^p \leq 0 - \text{упругость} \quad (1.12)$$

$$\sigma_u^* = C \cap \dot{\varepsilon}_{u^*}^p > 0 - \text{упругопластичность}$$

$$\dot{\omega} = \alpha \omega^{\frac{\alpha-1}{\alpha}} \frac{\mathbf{a}^{(2)} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p}{W_a}, \quad \alpha = (\sigma_a^{(2)} / a_u^{(2)})^{n_\alpha}, \quad a_u^{(2)} = \left(\frac{3}{2} \mathbf{a}^{(2)} : \mathbf{a}^{(2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.13)$$

Здесь $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$ – тензоры скоростей полной, упругой и пластической деформаций; $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{s}, \mathbf{s}^*, \mathbf{a}$ – тензор напряжений, девиаторы напряжений, активных напряжений и микронапряжений; $\varepsilon_{u^*}^p$ – накопленная пластическая деформация; ω – поврежденность; E, ν – модуль Юнга, коэффициент Пуассона; C – радиус (размер) поверхности нагружения; $\mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)}, \mathbf{a}^{(m)}$ – микронапряжения (девиатор смещения центра поверхности нагружения) первого, второго и третьего типов; $q_\varepsilon, g^{(m)}, g_a^{(m)}$ – определяющие функции, связь которых с материальными будет приведена ниже.

2. Эксперимент. В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований образцов нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Химический состав и механические свойства стали представлены в табл. 1.

Испытания проведены на универсальной испытательной машине Zwick Z100. Геометрия и размеры испытанных образцов соответствуют требованиям стандарта ASTM

Таблица 1

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
<0.12	<0.8	<2	9–11	<0.02	<0.035	17–19	<0.3	0.4–1	~67
Модуль Юнга (ГПа)		Коэффициент Пуассона		Предел текучести (МПа)		Предел прочно- сти (МПа)		Относительное удлинение при разрыве (%)	
198		0.28		196		510		40	

Е606. Диаметр рабочей части образца 8 мм, длина 24 мм, радиусы перехода от рабочей к захватной части 32 мм (рис. 1). Деформация в процессе испытания измерялась и контролировалась по навесному экстензометру с измерительной базой 10 мм.

3. Монотонное и циклическое нагружения нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований нержавеющей стали 12Х18Н10Т при одноосном жестком нагружении, включающем в себя этапы монотонных и циклических нагружений. Эксперимент состоит из 5-ти этапов нагружения:

– 1 этап включает в себя циклическое нагружение с частотой 0.2 Гц при $\epsilon_m^{(1)} = 0$, $\Delta\epsilon^{(1)} = 0.016$ и $N^{(1)} = 20$ циклов;

– 2 этап включает в себя монотонное растяжение до $\epsilon^{(2)} = 0.05$;

– 3 этап включает в себя циклическое нагружение с частотой 0.4 Гц при $\epsilon_m^{(3)} = 0.05$, $\Delta\epsilon^{(3)} = 0.012$ и $N^{(3)} = 200$ циклов;

– 4 этап включает в себя монотонное растяжение до $\epsilon^{(4)} = 0.1$;

– 5 этап включает в себя циклическое нагружение с частотой 0.4 Гц при $\epsilon_m^{(5)} = 0.1$, $\Delta\epsilon^{(5)} = 0.012$ и $N^{(5)} = N_f$ циклов до разрушения.

Здесь $\epsilon_m^{(i)}$ – средняя деформация цикла; $\Delta\epsilon^{(i)}$ – размах деформации цикла; $\epsilon^{(i)}$ – достигаемая деформация при монотонном нагружении; $N^{(i)}$ – число циклов.

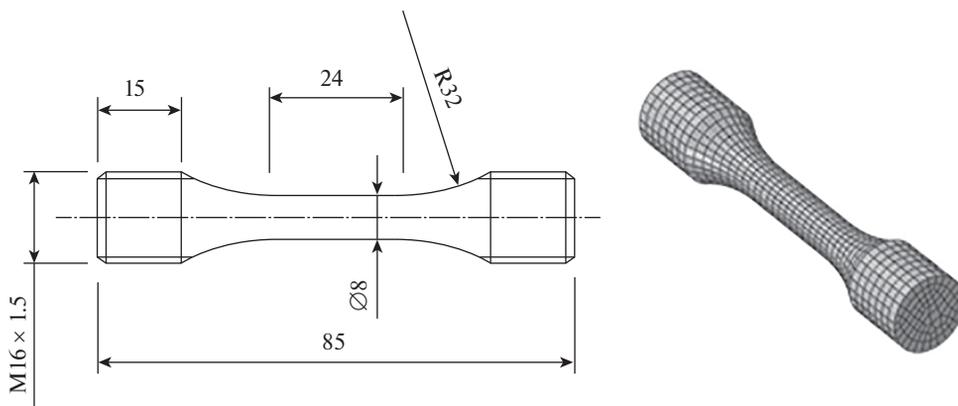


Рис. 1

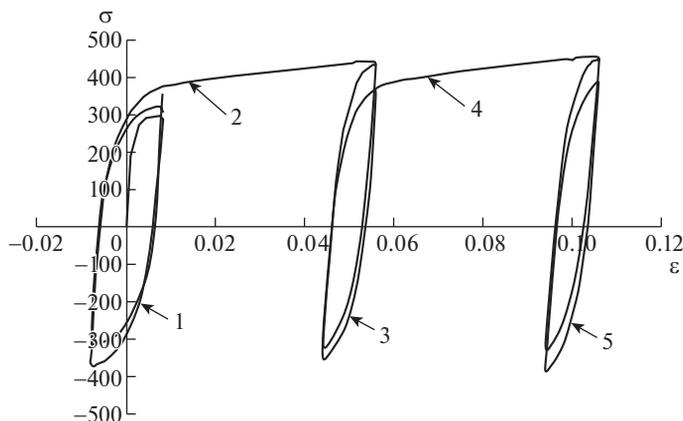


Рис. 2

На рис. 2 приведена экспериментальная диаграмма $\sigma(\epsilon)$ (σ [МПа]) деформирования стали 12X18H10T, включающая все пять этапов нагружения. На циклических диаграммах первого, третьего и пятого этапов показаны петли для первого и последнего циклов. Далее анализируются полученные экспериментальные результаты.

Циклическое деформирование на первом этапе показывает, что сталь 12X18H10T на начальной стадии циклически упрочняется с последующим замедлением процесса циклического упрочнения до незначительного ($dC_p/d\epsilon_{u*}^p \approx 1$ МПа) и сталь становится практически циклически стабильной.

На третьем и пятом этапах циклического деформирования имеет место посадка петли гистерезиса. Причем процессы посадки на этих этапах идентичны — как будто и не было предварительной истории деформирования. Таким образом модуль E_a , входящий в эволюционное уравнение для микронапряжений первого типа и обеспечивающий процесс посадки петли, должен иметь одинаковое начальное значение $E_a = E_{a0}$. Т.е. на этапах монотонного нагружения после циклических нагружений, на которых происходит падение E_a практически до нуля, должен происходить быстрый возврат модуля E_a к своему начальному значению E_{a0} .

На втором и четвертом этапах монотонных нагружений упрочнение является одинаковым и постоянным. Упрочнение здесь определяется модулем E_{a0} и в меньшей степени некоторым модулем монотонного изотропного упрочнения.

Таким образом поведение модуля E_a , характеризующего анизотропное упрочнение, и, соответственно, поведение параметров изотропного упрочнения существенно зависит от режима процесса деформирования — циклического или монотонного.

Для разделения процессов монотонного и циклического деформирования в пространстве тензора пластических деформаций ϵ^p вводится поверхность памяти, ограничивающая область циклического деформирования. Поверхность определяется положением ее центра ξ и ее радиусом (размером) C_ϵ . Для вычисления центра и размера поверхности вводится два тензора пластических деформаций $\epsilon^{p(1)}$ и $\epsilon^{p(2)}$, определяющие границы поверхности. В начале деформирования эти переменные равны нулю. Определение смещения и размера поверхности памяти происходит в момент смены

направления пластического деформирования. В качестве критерия смены направления принимается следующее условие:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t-0)}^p : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t)}^p < 0$$

где $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t)}^p$ – тензор скоростей пластической деформации в текущий момент времени; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t-0)}^p$ – тензор скоростей пластической деформации в предшествующий момент времени.

В этот момент изменение границ, центра и размера поверхности нагружения описывается на основе следующих соотношений:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{p(2)} = \boldsymbol{\varepsilon}^{p(1)}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}^{p(1)} = \boldsymbol{\varepsilon}^p, \quad \boldsymbol{\xi} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}^{p(1)} + \boldsymbol{\varepsilon}^{p(2)}}{2}, \quad C_\varepsilon = \left[\frac{2}{3} \left(\frac{\boldsymbol{\varepsilon}^{p(1)} - \boldsymbol{\varepsilon}^{p(2)}}{2} \right) : \left(\frac{\boldsymbol{\varepsilon}^{p(1)} - \boldsymbol{\varepsilon}^{p(2)}}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Тогда условием циклического деформирования является деформирование в пределах поверхности памяти

$$\left[\frac{2}{3} (\boldsymbol{\varepsilon}^p - \boldsymbol{\xi}) : (\boldsymbol{\varepsilon}^p - \boldsymbol{\xi}) \right]^{\frac{1}{2}} \leq C_\varepsilon$$

Вне поверхности памяти деформирование является монотонным.

На основании, изложенных выше, особенностей монотонных и циклических нагружений для модуля E_a и определяющих функций для микронапряжений формулируются следующие уравнения:

$$g^{(1)} = E_a, \quad g^{(2)} = \beta^{(2)} \sigma_a^{(2)}, \quad g_a^{(2)} = -\beta^{(2)}$$

$$g^{(m)} = \begin{cases} \beta^{(m)} \sigma_a^{(m)} \\ 0, \text{ если } a_u^{(m)} \geq \sigma_a^{(m)} \cap \mathbf{a}^{(m)} : \mathbf{s}^* > 0, \end{cases} \quad a_u^{(m)} = \left(\frac{3}{2} \mathbf{a}^{(m)} \mathbf{a}^{(m)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (m = 3, \dots, M)$$

$$\dot{E}_a = \begin{cases} -K_E \left(\frac{E_a}{E_{a0}} \right)^{n_E} \dot{\varepsilon}_{u^*}^p & \text{при циклическом нагружении} \\ M_E \left(\frac{E_{a0} - E_a}{E_{a0}} \right) \dot{\varepsilon}_{u^*}^p & \text{при монотонном нагружении} \end{cases}$$

$$g_a^{(1)} = \begin{cases} \frac{1}{E_a} \frac{dE_a}{d\varepsilon_{u^*}^p} & \text{при циклическом нагружении} \\ 0 & \text{при монотонном нагружении} \end{cases}$$

Итак, для описания микронапряжений надо определить следующие материальные функции:

$E_{a0}, \sigma_a^{(m)}, \beta^{(m)}$ – модули анизотропного упрочнения;

K_E, n_E, M_E – параметры анизотропного упрочнения при циклическом и монотонном деформировании.

Для определения этих материальных функций используются результаты эксперимента на рис. 2.

Модуль анизотропного упрочнения E_{a0} определяется по формуле

$$E_{a0} = \frac{\sigma_m^{(3)}}{\varepsilon_m^{p(3)}}$$

где $\sigma_m^{(3)}$ – среднее напряжение на первом цикле третьего этапа; $\epsilon_m^{p(3)}$ – средняя пластическая деформация на первом цикле третьего этапа.

Модули анизотропного упрочнения $\sigma_a^{(m)}$ и $\beta^{(m)}$ определяются из обработки циклической диаграммы последнего полуцикла первого этапа по методике описанной в работах [1, 9].

Параметры анизотропного упрочнения K_E и n_E определяются на основе результатов посадки петли гистерезиса на третьем и пятом этапах. Для этого строится зависимость в координатах

$$Y_E = \ln \left[\frac{\sigma_m(N-1) - \sigma_m(N)}{2\Delta\epsilon^p \epsilon_m^p} \right], \quad X_E = \ln \left[\frac{\sigma_m(N)}{\epsilon_m^p E_{a0}} \right]$$

где N – номер цикла; $\sigma_m(N)$ – среднее напряжение N -го цикла; $\Delta\epsilon^p$ – размах пластической деформации; ϵ_m^p – средняя пластическая деформация. Полученная зависимость аппроксимируется линейной функцией

$$Y_E = a_E X_E + b_E, \quad K_E = \exp(b_E), \quad n_E = a_E$$

Параметр анизотропного упрочнения M_E при монотонном нагружении определяется из соображения восстановления параметра E_a с 0 до значения E_{a0} при изменении пластической деформации при монотонном нагружении за ϵ_{st}^p . Тогда параметр M_E будет определяться по формуле

$$M_E = \frac{E_{a0}}{\epsilon_{st}^p}$$

Определив микронапряжения по всему процессу от первого до пятого этапа нагружения, можно определить поведение размера (радиуса) поверхности нагружения, т.е. изменение изотропного упрочнения в переходных процессах от циклического к монотонному и от монотонного к циклическому деформированию.

На рис. 3 приведено изменение размера поверхности нагружения (функционала C [МПа]) по всему процессу деформирования от первого до пятого этапа нагружения. Пунктиром на рис. 3 показана функция изотропного упрочнения $C = C_p(\epsilon_{u^*}^p)$ при циклическом нагружении.

Анализ результатов, приведенных на рис. 3, показывает, что при переходе от циклического деформирования к монотонному (этапы два и четыре) происходит увеличение интенсивности изотропного упрочнения, а при переходе от монотонного к циклическому (этапы три и пять) происходит медленное уменьшение изотропного упрочнения и оно стремится к изотропному $C = C_p(\epsilon_{u^*}^p)$ при циклическом деформировании.

На основании, изложенных выше, особенностей изменения изотропного упрочнения при циклических и монотонных нагружениях для определяющей функции изотропного упрочнения принимается следующая зависимость:

$$q_\epsilon = \begin{cases} \left[\frac{dC_p}{d\epsilon_{u^*}^p} - K_C \left(\frac{C - C_p}{C_p} \right)^{n_C} \right] & \text{при циклическом нагружении} \\ \left[\frac{dC_p}{d\epsilon_{u^*}^p} + M_C \right] & \text{при монотонном нагружении} \end{cases}$$

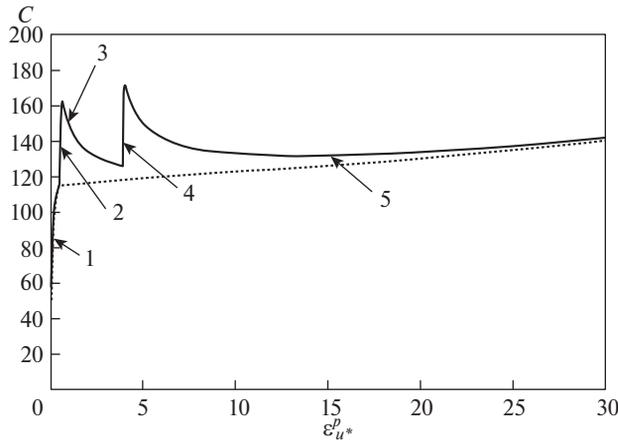


Рис. 3

Итак, для описания изотропного упрочнения надо определить следующие материальные функции:

$C_p(\epsilon_{u*}^p)$ – функция изотропного упрочнения при циклическом нагружении;

K_C, n_C, M_C – модули изотропного упрочнения при циклическом и монотонном нагружении.

Для определения этих материальных функций используются результаты эксперимента на рис. 3.

Функция изотропного упрочнения при циклическом нагружении $C_p(\epsilon_{u*}^p)$ определяется на основе изменения размера поверхности на первом, третьем и пятом этапах – пунктирная кривая на рис. 3.

Параметры изотропного упрочнения K_C и n_C при циклическом нагружении определяются на основе результатов уменьшения размера поверхности нагружения на третьем и пятом этапах нагружения. Для этого строится зависимость в координатах

$$Y_C = \ln \left[\frac{d(C_p - C)}{d\epsilon_{u*}^p} \right], \quad X_C = \ln \left[\frac{(C - C_p)}{C_p} \right]$$

Полученная зависимость аппроксимируется линейной функцией

$$Y = a_C X_C + b_C, \quad K_C = \exp(b_C), \quad n_C = a_C$$

Параметр изотропного упрочнения M_C при монотонном нагружении определяется по наклону кривой деформирования на втором и четвертом этапах по формуле

$$M_C = \frac{d\sigma}{d\epsilon^p} - E_{a0} - \frac{dC_p}{d\epsilon^p}$$

4. Верификация модифицированной теории пластичности. С целью верификации модифицированной теории пластичности и проверки адекватности аппроксимаций материальных функций проводится расчет кинетики напряженно-деформированного состояния нержавеющей стали 12Х18Н10Т при жестком циклическом и монотонном нагружении по программе (пять этапов) изложенной во втором разделе. Для расчетов использовались материальные функции, полученные на основе экспериментальных

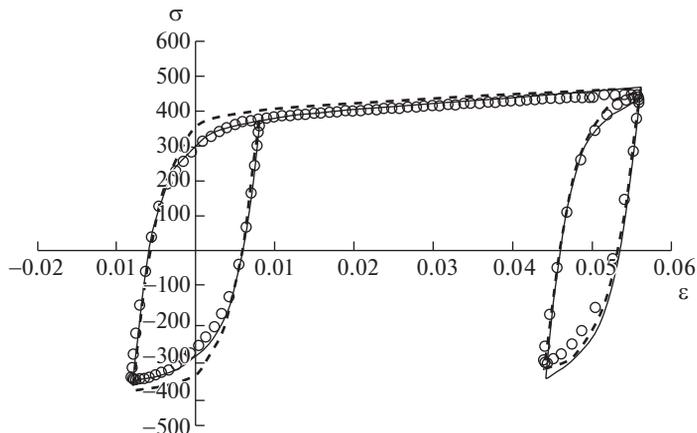


Рис. 4

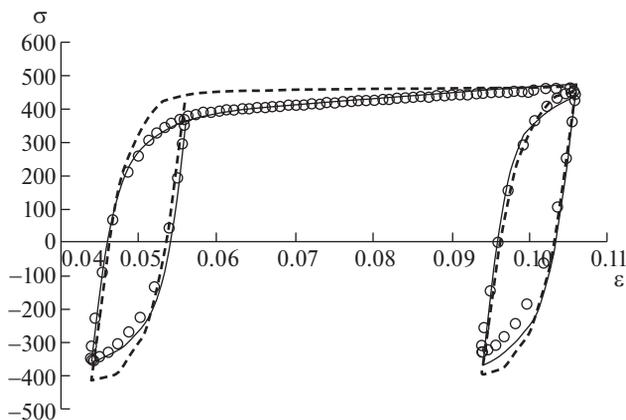


Рис. 5

данных на рис. 2. Сравнения расчетных (сплошные кривые) и экспериментальных (светлые кружки) результатов приведены на рис. 4–7. Пунктирными кривыми приведены результаты расчетов на основе варианта [10]. На рис. 4 показана циклическая диаграмма 20-го цикла (последнего) первого этапа, монотонное нагружение на втором этапе и первый цикл третьего этапа. На рис. 5 показана циклическая диаграмма 200-го цикла (последнего) третьего этапа, монотонное нагружение на четвертом этапе и первый цикл пятого этапа. Изменения размаха напряжения и среднего напряжения циклов на первом, третьем и пятом этапах нагружения приведены на рис. 6, 7. Все напряжения и размах напряжений на рис. 4–7 измеряются в МПа.

Наблюдается значительное улучшение описания кинетики напряженно-деформированного состояния на основе предложенного здесь варианта по сравнению с предыдущим [10]. Что же касается изменений размаха и среднего напряжения циклов, то предложенный вариант достаточно адекватно описывает и эти довольно сложные процессы.

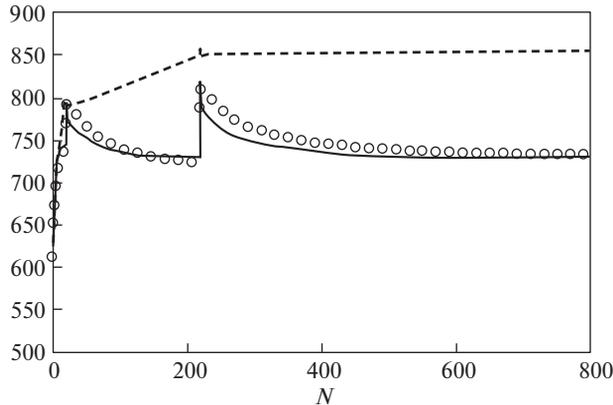


Рис. 6

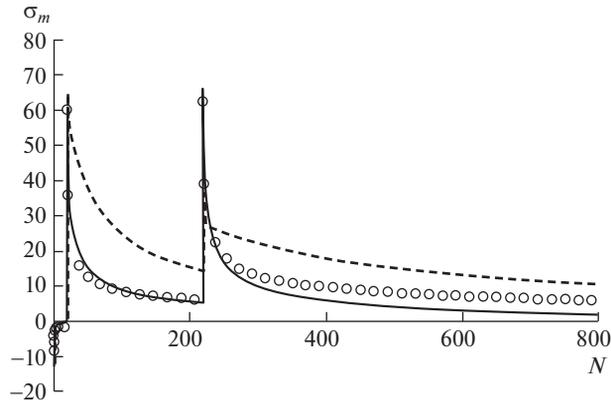


Рис. 7

Заклучение. На основе анализа результатов экспериментальных исследований нержавеющей стали установлено, что изотропное и анизотропное упрочнения существенно различны при монотонном и циклическом деформировании. Также имеют место переходные процессы упрочнения при смене процессов монотонного и циклического, циклического и монотонного деформирования.

С учетом выявленных особенностей монотонных и циклических нагружений, уточнены уравнения модифицированной теории пластичности. Определен базовый эксперимент, сформулирован метод идентификации материальных функций и получены материальные функции нержавеющей стали 12X18H10T при комнатной температуре.

Проведено сравнение результатов расчетных и экспериментальных исследований нержавеющей стали 12X18H10T при жестком нагружении, состоящем из последовательности монотонных и циклических режимов нагружения. Анализировалась кинетика напряженно-деформированного состояния, рассматривались изменения размаха и среднего напряжения цикла в процессе циклических нагружений. Получено надежное соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

Достаточно адекватное описание теорией процессов изменения кинетики, размаха и среднего напряжения цикла при жестком нагружении позволяет предположить возможность более адекватного описания и процессов мягкого нагружения особенно при нестационарных несимметричных режимах нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bondar V.S.* Inelasticity. Variants of the theory. New York: Begell House, 2013. 194 p.
2. *Волков И.А., Коротких Ю.Г.* Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 424 с.
3. *Митенков Ф.М., Волков И.А., Игумнов Л.А., Каплиенко А.В., Коротких Ю.Г., Панов В.А.* Прикладная теория пластичности. М.: Физматлит, 2015. 282 с.
4. *Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г.* Прикладная теория вязкопластичности: Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2015. 317 с.
5. *Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А.* Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 347 с.
6. *Бессон Ж. [и др].* Нелинейная механика материалов. Санкт-Петербург: Изд-во политехн. ун-та, 2010. 397 с.
7. *Chaboche J.-L.* A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories // *Int. J. of Plasticity*. 2008. V. 24. P. 1642–1692.
8. *Chaboche J.-L., Kanouté P., Azzouz F.* Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions // *Int. J. of Plasticity*. 2012. V. 35. P. 44–66.
9. *Bondar V.S., Danshin V.V., Vu L.D., Duc N.D.* Constitutive modeling of cyclic plasticity deformation and low-high-cycle fatigue of stainless steel 304 in uniaxial stress state // *Mechanics of advanced materials and structures*. 2018. V. 25. № 12. P. 1009–1017.
10. *Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Петров В.К.* Сравнительный анализ вариантов теорий пластичности при циклических нагружениях // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2017. № 2. С. 23–44.
11. *Коротких Ю.Г.* Описание процессов накопления повреждений материала при неизотермическом вязкопластическом деформировании // *Проблемы прочности*. 1985. № 1. С. 18–23.
12. *Волков И.А., Игумнов Л.А., Тарасов И.С. и др.* Моделирование усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при блочном несимметричном малоцикловом нагружении // *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. № 1. С. 15–30.