



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.05

УДК 539.374

О ПОВЕРХНОСТЯХ ПАМЯТИ, РАЗДЕЛЯЮЩИХ ПРОЦЕССЫ МОНОТОННЫХ И ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ

В.С. Бондарь, Д.Р. Абашев

Московский политехнический университет, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 22 марта 2022 г.
Одобрена: 12 октября 2022 г.
Принята к публикации:
01 ноября 2022 г.

Ключевые слова:

пластическое деформирование, поверхность памяти, монотонные и циклические нагружения, расчет и эксперимент, число циклов до разрушения.

АННОТАЦИЯ

Процессы упругопластического деформирования конструкционных материалов могут состоять из последовательности монотонных и циклических режимов нагружения, при которых возникают своеобразные эффекты и особенности. Математическое моделирование таких процессов, а также оценка и прогнозирование ресурса представляют собой весьма сложную задачу. К тому же анализ переходных процессов от циклического к монотонному и от монотонного к циклическому показывает необходимость разделения этих процессов. На основе анализа результатов экспериментальных исследований образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т при жестком (контролируемые деформации) процессе деформирования, представляющим собой последовательности монотонных и циклических режимов нагружения, в условиях одноосного растяжения-сжатия при нормальной температуре выявлены особенности и различия процессов монотонных и циклических нагружений. Для описания этих особенностей и разделения процессов монотонных и циклических режимов нагружения в теориях пластического течения при комбинированном упрочнении вводятся различные варианты поверхностей памяти. Анализ результатов экспериментальных исследований нержавеющей стали показал, что в пространстве тензора пластических деформаций размер поверхности памяти определяется размахом пластических деформаций, а положение центра – значениями средних пластических деформаций при циклическом нагружении. Рассмотрены различные варианты поверхности памяти, выявлены их возможности и недостатки и определен наиболее адекватный вариант поверхности памяти. Для подтверждения работоспособности этого варианта поверхности памяти совместно с уравнениями модели пластичности Бондаря проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов и получено надежное соответствие этих результатов как по кинетике напряженно-деформированного состояния, так и по числу циклов до разрушения.

© ПНИПУ

© Бондарь Валентин Степанович – д.ф.-м.н., проф., e-mail: tm@mospolytech.ru
Абашев Дмитрий Рустамович – к.ф.-м.н., доц., e-mail: tm@mospolytech.ru

Valentin S. Bondar – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: tm@mospolytech.ru
Dmitry R. Abashev – CSc in Physical and Mathematical Sciences, e-mail: tm@mospolytech.ru



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

MEMORY SURFACES SEPARATING THE PROCESSES OF MONOTONOUS AND CYCLIC LOADS

V.S. Bondar, D.R. Abashev

Moscow polytechnical university, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 22 March 2022
Approved: 12 October 2022
Accepted for publication:
01 November 2022

Keywords:

plastic deformation, memory surface, monotonic and cyclic loading, calculation and experiment, number of cycles to failure.

ABSTRACT

The processes of elastoplastic deformation of structural materials can consist of a sequence of monotonous and cyclic loading regimes, in which peculiar effects and features arise. Mathematical modeling of such processes, as well as resource assessment and forecasting, is a very difficult task. In addition, the analysis of transient processes from cyclic to monotonous and from monotonous to cyclic shows the need to separate these processes. Based on the analysis of the results of experimental studies of samples of stainless steel 12X18H10T under a rigid (controlled deformation) deformation process, which is a sequence of monotonic and cyclic loading modes, under conditions of uniaxial tension-compression at normal temperature, the features and differences in the processes of monotonic and cyclic loading are revealed. To describe these features and separate the processes of monotonic and cyclic loading modes in the theories of plastic flow with combined hardening, various variants of memory surfaces are introduced. An analysis of the results of experimental studies of stainless steel showed that in the space of the plastic strain tensor, the size of the memory surface is determined by the range of plastic strains, and the position of the center is determined by the values of average plastic strains under cyclic loading. Various variants of the memory surface are considered, their capabilities and disadvantages are identified, and the most adequate variant of the memory surface is determined. To confirm the operability of this version of the memory surface, together with the equations of the Bondar plasticity model, the calculated and experimental results were compared and a reliable agreement was obtained between these results both in terms of the kinetics of the stress-strain state and in terms of the number of cycles to failure.

© PNRPU

Введение

Нестационарные и несимметричные процессы циклического деформирования состоят из последовательности монотонных и циклических режимов нагружения, при которых возникают своеобразные эффекты посадки и вышагивания (ratcheting) петель пластического гистерезиса. Математическое моделирование таких процессов в условиях жесткого (контролируемые деформации) и особенно мягкого (контролируемые напряжения) нагружений, а также оценка и прогнозирование ресурса представляют собой весьма сложную задачу. К тому же анализ [1–17] переходных процессов от циклического к монотонному и от монотонного к циклическому показывает необходимость разделения процессов монотонного и циклического деформирования. Для этого в пространствах тензора микронапряжений или тензора пластических деформаций или других пространствах вводится поверхность памяти, что разделяет циклические и монотонные процессы деформирования [1–17].

Математическое моделирование таких процессов деформирования и накопления повреждений строится в основном на вариантах теорий пластичности [1–41], относящихся к классу теорий пластического течения при комбинированном (изотропном и анизотропном) упрочнении. В настоящей работе математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений базируется на варианте теории пластичности – модели Бондаря [19], который, как показано в работах [39–41], является наиболее адекватным вариантом

описания процессов деформирования и разрушения при циклических нагружениях по сравнению с моделями Коротких [1–8] и Шабоша [10; 20; 23; 27].

В настоящей работе на основе анализа результатов экспериментальных исследований выявлены особенности эволюции поверхности памяти при различных последовательностях монотонных и циклических режимов нагружения. Рассмотрены различные варианты поверхности памяти, выявлены их возможности и недостатки и определен наиболее адекватный вариант поверхности памяти, разделяющий процессы монотонного и циклического нагружений.

Для подтверждения работоспособности варианта поверхности памяти совместно с уравнениями варианта теории пластичности – модели Бондаря, проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов исследований нержавеющей стали 12X18H10T при жестком нагружении, состоящем из последовательности монотонных и циклических режимов нагружения. Сравнение проводится по кинетике напряженно-деформированного состояния, размаху и среднему напряжению цикла в процессе этапов циклических нагружений, а также по числу циклов до разрушения.

1. Эксперимент

Рассматриваются экспериментальные исследования цилиндрических образцов нержавеющей стали 12X18H10T. Химический состав и механические свойства представлены в таблице.

Химический состав и механические свойства стали
12Х18Н10Т

Chemical composition and mechanical properties of steel
12Х18Н10Т

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

$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²
225–315	550–650	46–74	66–80	215–372

Испытания проводятся на универсальной испытательной машине Zwick Z100. Геометрия и размеры испытываемых образцов соответствуют требованиям стандарта ASTM E606. Диаметр рабочей части образца 8 мм, длина рабочей части образца 24 мм, радиус перехода от рабочей к захватной части 32 мм (рис. 1).

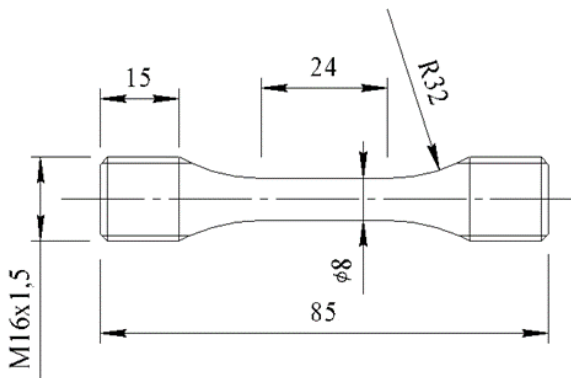


Рис. 1. Образец для испытаний по ASTM E606

Fig. 1. Test specimen according to ASTM E606

Деформация в процессе испытаний измеряется и контролируется по навесному экстензометру с измерительной базой в 10 мм. Погрешность измерения осевой силы составляет 1 % и осевого перемещения – 1 %. Реализуется жесткое нагружение, т.е. нагружение при заданном значении изменения осевой деформации. Деформирование образца осуществляется при комнатной температуре со скоростью, равной 0,5 % с⁻¹ при монотонном нагружении, и частотой 0,2 Гц – при циклическом нагружении.

2. Монотонные и циклические нагружения нержавеющей стали 12Х18Н10Т

Рассматриваются результаты двух экспериментальных исследований нержавеющей стали 12Х18Н10Т при одноосном жестком нагружении. Первый эксперимент включает в себя пять этапов монотонных и циклических нагружений с возрастающей монотонной деформацией. Эксперимент состоит из следующих этапов:

– 1-й этап включает в себя циклическое нагружение при $\varepsilon_m^{(1)} = 0$, $\Delta\varepsilon^{(1)} = 0,016$ и $N^{(1)} = 20$ циклов;

– 2-й этап включает в себя монотонное растяжение до $\varepsilon^{(2)} = 0,05$;

– 3-й этап включает в себя циклическое нагружение при $\varepsilon_m^{(3)} = 0,05$, $\Delta\varepsilon^{(3)} = 0,012$ и $N^{(3)} = 200$ циклов;

– 4-й этап включает в себя монотонное растяжение до $\varepsilon^{(4)} = 0,1$;

– 5-й этап включает в себя циклическое нагружение при $\varepsilon_m^{(5)} = 0,1$, $\Delta\varepsilon^{(5)} = 0,012$ и $N^{(5)} = N_f$ циклов до разрушения.

Здесь и далее $\varepsilon_m^{(i)}$ – средняя деформация цикла; $\Delta\varepsilon^{(i)}$ – размах деформаций цикла; $\varepsilon^{(i)}$ – достигаемая деформация при монотонном нагружении; $N^{(i)}$ – число циклов; i – номер этапа.

На рис. 2 приведена экспериментальная диаграмма деформирования стали 12Х18Н10Т для первого эксперимента, включая все пять этапов. На циклических диаграммах первого, третьего и пятого этапов показаны петли для первого и последнего циклов.

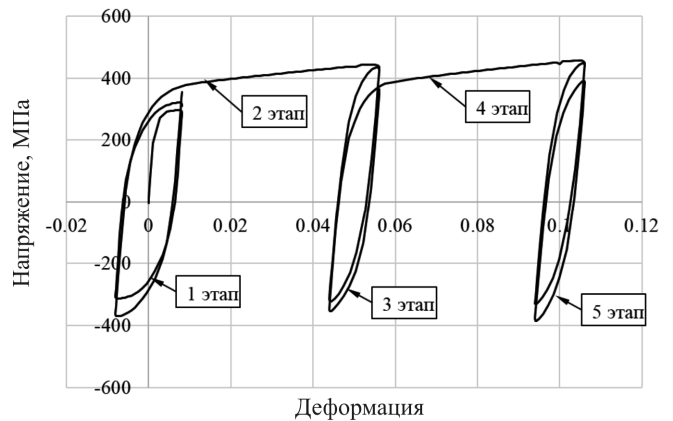


Рис. 2. Диаграмма деформирования стали 12Х18Н10Т для первого эксперимента

Fig. 2. Diagram of deformation of steel 12Kh18N10T for the first experiment

Второй эксперимент включает в себя семь этапов монотонных и циклических нагружений с возрастающей и убывающей монотонной деформацией. Эксперимент состоит из следующих этапов:

– 1-й этап включает циклическое нагружение при $\varepsilon_m^{(1)} = -0,006$, $\Delta\varepsilon^{(1)} = 0,012$ и $N^{(1)} = 100$ циклов;

– 2-й этап – монотонное растяжение до $\varepsilon^{(2)} = 0,05$;

– 3-й этап – циклическое нагружение при $\varepsilon_m^{(3)} = 0,05$, $\Delta\varepsilon^{(3)} = 0,012$ и $N^{(3)} = 200$ циклов;

– 4-й этап – монотонное сжатие до $\varepsilon^{(4)} = 0,02$;

– 5-й этап – циклическое нагружение при $\varepsilon_m^{(5)} = 0,02$, $\Delta\varepsilon^{(5)} = 0,012$ и $N^{(5)} = 200$ циклов;

– 6-й этап – монотонное растяжение до $\varepsilon^{(6)} = 0,05$;

– 7-й этап – циклическое нагружение при $\varepsilon_m^{(7)} = 0,05$, $\Delta\varepsilon^{(7)} = 0,012$ и $N^{(7)} = N_f$ циклов до разрушения.

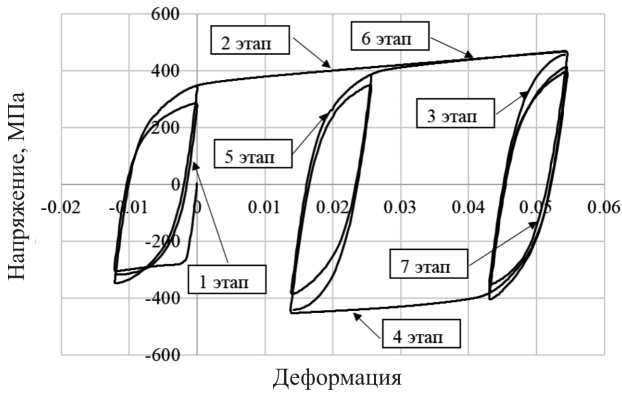


Рис. 3. Диаграмма деформирования стали 12Xh18N10T для второго эксперимента

Fig. 3. Diagram of deformation of steel 12Kh18N10T for the second experiment

На рис. 3 приведена экспериментальная диаграмма деформирования стали 12Xh18N10T для второго эксперимента, включая все семь этапов. На циклических диаграммах 1, 3, 5-го и 7-го этапов показаны петли для первого и последнего циклов.

Анализ результатов экспериментальных исследований, представленных на рис. 2, 3, показывает:

- циклическое деформирование на 1-м и последующих этапах первого и второго эксперимента является циклически упрочняющимся с последующим замедлением после 1-го этапа процесса циклического упрочнения до незначительного ($\frac{dC_p}{d\varepsilon_u^p} \approx 1 \text{ МПа}$), и материал становится практически циклически стабильным;

- на 3-м и 5-м этапах первого эксперимента и 3, 5-м и 7-м этапах второго эксперимента имеет место посадка петли гистерезиса. Причем процессы посадки на этих этапах идентичны – как будто и не было предварительной истории деформирования;

- на 2-м и 4-м этапах первого эксперимента и 2, 4-м и 6-м этапах второго эксперимента монотонное нагружение осуществляется с одинаковым упрочнением;

- процессы циклического и монотонного нагружений различны, как и процессы анизотропного и изотропного упрочнения при монотонных и циклических нагружениях. К тому же имеют место области перехода от циклического к монотонному и от монотонного к циклическому процессам нагружения.

Для разделения процессов монотонного и циклического деформирования в пространстве тензора пластических деформаций можно ввести поверхность памяти, ограничивающую область циклического деформирования. Из анализа результатов первого эксперимента, представленных на рис. 2, следует, что правая граница поверхности перемещается вправо вместе с правыми границами этапов 1, 3-го и 5-го циклических нагружений. При выходе за поверхность памяти происходит монотонное нагружение – этапы 2 и 4. Из анализа результатов второго эксперимента, представленных на рис. 3, следу-

ет, что левая граница поверхности памяти перемещается вместе с левыми границами этапов 1, 3, 5-го и 7-го циклических нагружений. При выходе за поверхность памяти происходит монотонное нагружение – этапы 2, 4 и 6. Этап 4 монотонного нагружения подтверждает, что левая граница поверхности памяти перемещается вместе с левой границей циклического нагружения на этапе 3.

Таким образом поверхность памяти имеет размер, который определяется размахом деформаций при циклическом нагружении, а положение центра определяется значениями средних деформаций при циклическом нагружении.

На рис. 4, 5 приводится кинетика поверхности памяти для первого и второго экспериментов в плоскости компонент ε_1^p и ε_2^p вектора пластической деформации. Построение поверхности памяти осуществлено в соответствии с результатами экспериментальных исследований, изложенных выше. На первом эксперименте 0-й этап соответствует отнулевому полуциклу. Этапам монотонных нагружений поверхности памяти на рис. 4 и 5 соответствуют концы этапов монотонных нагружений.

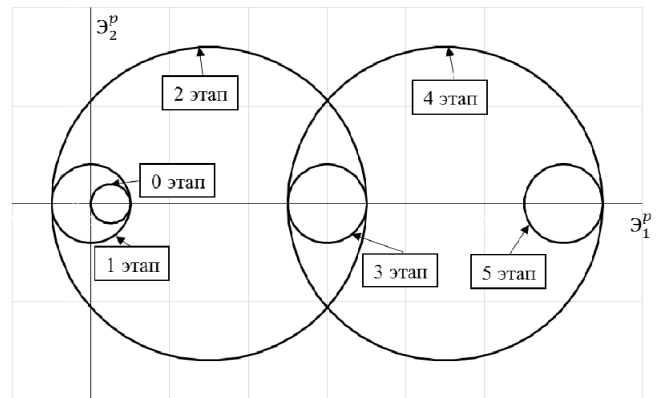


Рис. 4. Кинетика поверхности памяти в первом эксперименте

Fig. 4. Memory surface kinetics in the first experiment

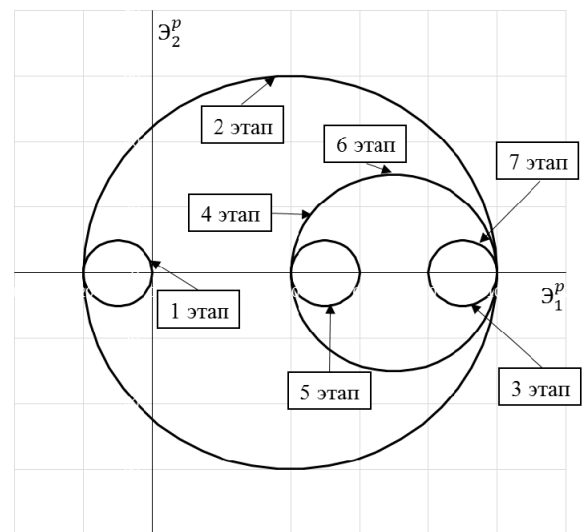


Рис. 5. Кинетика поверхности памяти во втором эксперименте

Fig. 5. Memory surface kinetics in the second experiment

3. Варианты поверхности памяти

Далее рассматриваются и анализируются различные варианты поверхности памяти на основе приведенных выше результатов экспериментальных исследований.

В работах [1–8] для разделения процессов монотонного и циклического деформирования вводится поверхность памяти в пространстве девиатора микронапряжений ρ_{ij} с определением в процессе деформирования максимального значения интенсивности микронапряжений ρ_{\max}

$$F_p = \rho_{ij}\rho_{ij} - \rho_{\max}^2 = 0. \quad (1)$$

Эволюционные уравнения для ρ_{ij} и ρ_{\max} в этих работах задаются в следующем виде:

$$\dot{\rho}_{ij} = g_1 \dot{\varepsilon}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \dot{\chi}, \quad (2)$$

$$\dot{\rho}_{\max} = \frac{(\rho_{ij}\dot{\rho}_{ij})H(F_p)}{(\rho_{ij}\rho_{ij})^{1/2}} - g_2 \rho_{\max} \dot{\chi}, \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ – тензор скоростей пластической деформации; $\dot{\chi} = \left(\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_{ij}^p\dot{\varepsilon}_{ij}^p\right)^{1/2}$ – скорость накопленной пластической деформации; g_1 и g_2 – модули кинематического упрочнения.

$$H(F_p) = \begin{cases} 1, & \text{при } F_p = 0 \text{ и } \rho_{ij}\dot{\rho}_{ij} \geq 0, \\ 0, & \text{при } F_p < 0 \text{ и } \rho_{ij}\dot{\rho}_{ij} < 0. \end{cases} \quad (4)$$

При одноосном монотонном растяжении, подставляя (2) в (3), можно получить эволюционные уравнения для ρ_{\max} и ρ

$$\dot{\rho}_{\max} = g_1 \dot{\varepsilon}^p - g_2 (\rho + \rho_{\max}) \dot{\varepsilon}^p, \quad (5)$$

$$\dot{\rho} = g_1 \dot{\varepsilon}^p - g_2 \rho \dot{\varepsilon}^p. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) следует, что определяемые по уравнению (5) максимальные микронапряжения не соответствуют действительным микронапряжениям, определяемым уравнением (6). К тому же при циклическом деформировании при снятии микронапряжений ($\rho_{ij}\dot{\rho}_{ij} < 0$) эволюционное уравнение для ρ_{\max} примет вид

$$\dot{\rho}_{\max} = -g_2 \rho_{\max} \dot{\chi}, \quad (7)$$

из которого следует, что ρ_{\max} уменьшается до нуля и поверхность памяти стягивается в точку. После чего при увеличении на цикле микронапряжений этот процесс будет определяться как монотонный, что не соответствует действительности.

Следующие варианты поверхности памяти вводятся в пространстве тензора пластических деформаций.

В работах [1; 2; 6] центр поверхности памяти остается в начале системы координат ($\varepsilon_{ij}^p = 0$), а размер по-

верхности определяется как интенсивность максимальной амплитуды пластической деформации.

$$F_{\varepsilon^p} = \left(\frac{2}{3}\varepsilon_{ij}^p\varepsilon_{ij}^p\right) - \varepsilon_{i\max}^p = 0. \quad (8)$$

Такая поверхность памяти противоречит полученному выше экспериментальному результату о смещении центра поверхности памяти.

Поверхность памяти, центр которой может смещаться, а размер увеличиваться, рассматривается в работах [9–11].

$$F = \left[\frac{2}{3}(\varepsilon_{ij}^p - \xi_{ij})(\varepsilon_{ij}^p - \xi_{ij})\right]^{1/2} - q_s = 0, \quad (9)$$

$$\dot{q}_s = \eta H(F) \langle n_{ij} n_{ij}^* \rangle \dot{p}, \quad (10)$$

$$\dot{\xi}_{ij} = (1 - \eta) \sqrt{\frac{3}{2}} H(F) \langle n_{ij} n_{ij}^* \rangle n_{ij}^* \dot{p}, \quad (11)$$

$$n_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\dot{\varepsilon}_{ij}^p}{\dot{q}_s}, n_{ij}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\varepsilon_{ij}^p - \xi_{ij}}{q_s}, \quad (12)$$

здесь η – параметр ($\eta \in [0, 1]$); $\dot{p} = \left(\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_{ij}^p\dot{\varepsilon}_{ij}^p\right)^{1/2}$ – скорость накопленной пластической деформации; $H(x)$ – функция Хевисайда.

Как следует из уравнения (10), размер поверхности памяти только увеличивается, тогда как в эксперименте размер поверхности памяти определяется размахом пластических деформаций при циклическом нагружении, и уменьшается при уменьшении размаха пластических деформаций на цикле.

В работе [8] также вводится поверхность памяти, которая может менять свой размер и перемещаться в пространстве тензора пластических деформаций.

$$F = (\varepsilon_{ij}^p - \xi_{ij})(\varepsilon_{ij}^p - \xi_{ij}) - a_{\max}^2 = 0, \quad (13)$$

где a_{\max} – максимальное значение интенсивности тензора пластических деформаций; ξ_{ij} – тензор одноосные накопленных пластических деформаций.

В данном подходе размер поверхности памяти только увеличивается, что не соответствует экспериментальным результатам, а при одноосном растяжении этот процесс сразу попадает внутрь поверхности памяти и перестает быть монотонным. К тому же неясно, что происходит с одноосные накопленной пластической деформацией, если она положительна, а затем отрицательна или наоборот.

В работах [12–17] авторов этой статьи для разделения процессов монотонного и циклического деформирования в пространстве пластических деформаций вводится поверхность памяти, которая следует за циклическим нагружением,

$$F_\varepsilon = \left[\frac{2}{3} (\varepsilon_{ij}^p - \xi_{ij}) (\varepsilon_{ij}^p - \xi_{ij}) \right]^{1/2} - C_\varepsilon = 0. \quad (14)$$

Для вычисления центра и размера поверхности вводятся два тензора пластической деформации $\varepsilon_{ij}^{p(1)}$ и $\varepsilon_{ij}^{p(2)}$, 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 деформирования принимается следующее условие:

$$\dot{\varepsilon}_{ij(t-0)}^p \dot{\varepsilon}_{ij(t)}^p < 0, \quad (15)$$

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

Условие (15) можно заменить следующим:

$$s_{ij(t-0)}^* s_{ij(t)}^* < 0, \quad (16)$$

так как в теории пластического течения при комбинированном упрочнении $\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} s_{ij}^*$. Здесь $s_{ij(t)}^*$ – девиатор активных [18] напряжений в текущий момент времени; $s_{ij(t-0)}^*$ – девиатор активных напряжений в предшествующий момент времени.

В этот момент изменение границ центра и размера поверхности памяти определяется на основе следующих соотношений:

$$\varepsilon_{ij}^{p(1)} = \varepsilon_{ij}^{p(2)}, \quad \varepsilon_{ij}^{p(2)} = \varepsilon_{ij}^p, \quad (17)$$

$$\xi_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}^{p(1)} + \varepsilon_{ij}^{p(2)}}{2}, \quad (18)$$

$$C_\varepsilon = \left[\frac{2}{3} \left(\frac{\varepsilon_{ij}^{p(2)} - \varepsilon_{ij}^{p(1)}}{2} \right) \left(\frac{\varepsilon_{ij}^{p(2)} - \varepsilon_{ij}^{p(1)}}{2} \right) \right]^{1/2}. \quad (19)$$

Тогда процесс деформирования будет монотонным или циклическим при выполнении следующих условий:

монотонный при:

$$F_\varepsilon > 0 \text{ или } (F_\varepsilon = 0 \text{ и } s_{ij(t-0)}^* s_{ij(t)}^* \geq 0), \quad (20)$$

циклический при:

$$F_\varepsilon < 0 \text{ или } (F_\varepsilon = 0 \text{ и } s_{ij(t-0)}^* s_{ij(t)}^* < 0). \quad (21)$$

Данное построение поверхности памяти отвечает всем требованиям, следующим из результатов экспериментальных исследований, приведенных выше.

4. Математическое моделирование процессов монотонных и циклических нагружений

Расчетные исследования [12–17] на основе варианта теории пластичности с поверхностью памяти, рассмотренной выше, при моделировании первого эксперимента показывают работоспособность предложенной модели пластичности.

Далее рассматривается моделирование на основе этого варианта [12–17] теории пластичности второго эксперимента, имеющего существенное отличие от первого эксперимента наличием этапа 4 (рис. 3) обратного монотонного деформирования после циклического.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов проводится по изменениям размаха и среднего напряжения на циклах нагружения. На рис. 6, 7 экспериментальные результаты показаны светлыми кружками, а расчетные – сплошными кривыми. Процесс посадки петли пластического гистерезиса иллюстрируется на рис. 7. Циклические диаграммы и этапы монотонного нагружения показаны на рис. 8–11. Здесь также кружки – эксперимент, а сплошные кривые – расчет.

Наблюдается надежное соответствие расчетных и экспериментальных результатов по всему процессу монотонных и циклических нагружений, имеющих место во втором эксперименте. На 7-м этапе циклического нагружения образец был доведен до разрушения. При эксперименте получено 2330 циклов до разрушения, а при расчете – 2400.

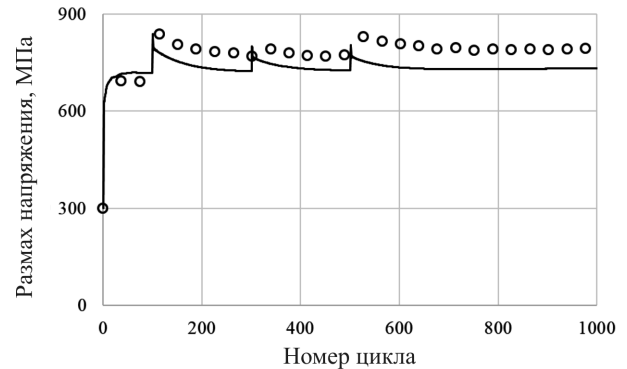


Рис. 6. Размах напряжения

Fig. 6. Stress range

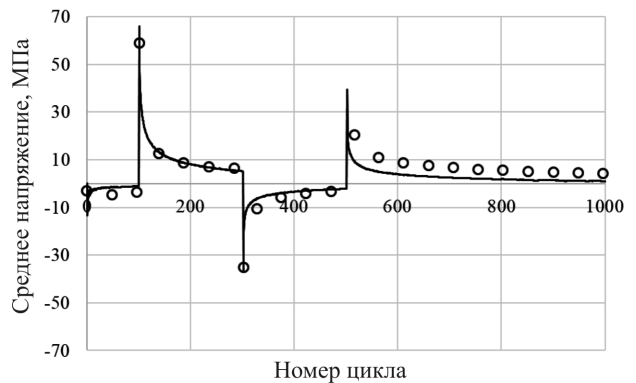


Рис. 7. Среднее напряжение

Fig. 7. Medium stress

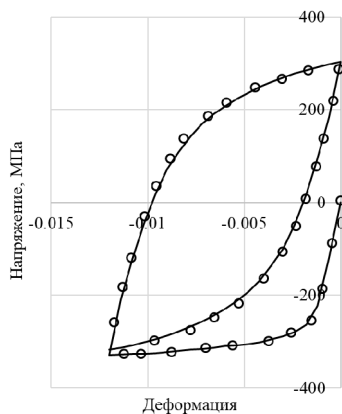


Рис. 8. Первый цикл 1-го этапа нагружения

Fig. 8. The first cycle of the first stage of loading

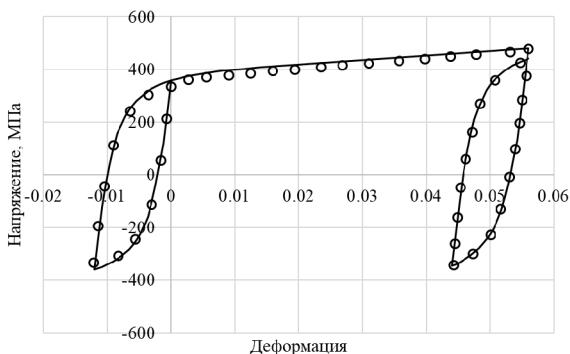


Рис. 9. Последний цикл 1-го этапа, 2-й этап и первый цикл 3-го этапа нагружения

Fig. 9. The last cycle of the first stage, the second stage and the first cycle of the third loading stage

Заключение

На основе анализа результатов экспериментальных исследований нержавеющей стали установлено, что размер поверхности памяти определяется размахами деформаций, а положение центра – значениями средних деформаций при циклическом нагружении. Поверхность памяти разделяет процессы монотонных и циклических нагружений.

Рассмотрены различные варианты поверхности памяти, выявлены их возможности и недостатки и определен наиболее адекватный вариант поверхности памяти.

Библиографический список

1. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 424 с.
2. Прикладная теория пластичности / Ф.М. Митенков [и др.]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 284 с.
3. Прикладная теория вязкопластичности: монография / И.А. Волков [и др.]. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. – 318 с.
4. Волков И.А., Игумнов Л.А. Введение в континуальную механику поврежденной среды. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 304 с.
5. Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А. Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конст-

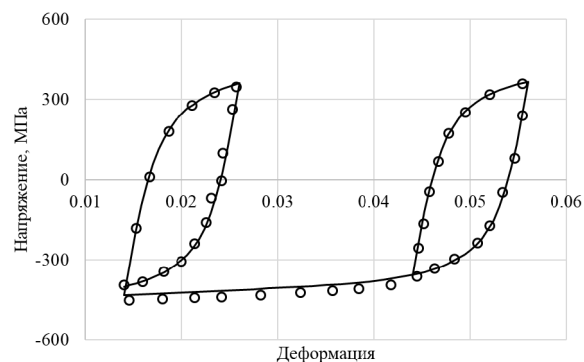


Рис. 10. Последний цикл 3-го этапа, 4-й этап и первый цикл 5-го этапа нагружения

Fig. 10. The last cycle of the third stage, the fourth stage and the first cycle of the fifth loading stage

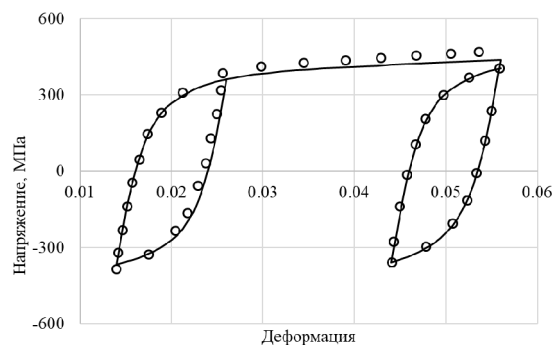


Рис. 11. Последний цикл 5-го этапа, 6-й этап и первый цикл 7-го этапа нагружения

Fig. 11. The last cycle of the fifth stage, the sixth stage and the first cycle of the seventh stage of loading

Для подтверждения работоспособности варианта поверхности памяти совместно с уравнениями модели пластичности Бондаря проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов исследований нержавеющей стали при жестком нагружении, состоящем из последовательности монотонных и циклических режимов нагружения. Получено надежное соответствие расчетных и экспериментальных результатов по кинетике напряженно-деформированного состояния, размаху и среднему напряжению цикла в процессе циклических и монотонных режимов нагружения, а также по числу циклов до разрушения.

рукций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. – 347 с.

6. Коротких Ю.Г. Описание процессов накопления повреждений материала при неизотермическом вязкопластическом деформировании // Проблемы прочности. – 1985. – № 1. – С. 18–23.

7. Моделирование усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при блочном несимметричном малоцикловом нагружении / И.А. Волков, Л.А. Игумнов, И.С. Тарасов, Д.Н. Шишулин, М.Т. Маркова // Проблемы прочности и пластичности. – 2018. – Т. 80, № 1. – С.15–30.

8. Оценка ресурсных характеристик поликристаллических конструкционных сплавов при циклическом термомеханическом нагружении / И.А. Волков, Л.А. Игумнов, Д.Н. Шишулин, А.А. Белов // Проблемы прочности и пластичности. – 2021. – Т. 83, № 4. – С. 481–504.
9. Ohno N. A constitutive model of cyclic plasticity with a non-hardening strain region // *J. Appl. Mech.* – 1982. – 49. – P. 721–727.
10. Chaboche J.L., Dang-Van k., and Cordier G., Modelization of the strain-memory-effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel // SMIRT-5 – Division L. – Berlin, 1979.
11. Wang Yu. Experimental and numerical evaluations of viscoplastic material behavior and multiaxial for austenitic and ferritic materials: dissertation of Dr. Ing. – С., 2014. – 163 p.
12. Бондарь В.С., Абашев Д.Р. Некоторые особенности процессов монотонных и циклических нагружений. Эксперимент и моделирование // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – № 2. – С. 25–34.
13. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Фомин Д.Ю. Вариант теории термопластичности для монотонных и циклических процессов неизотермических нагружений // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2020. – № 2. – С. 28–36.
14. Bondar V.S., Abashev D.R. Refining the thermoplasticity theory for modeling monotonic and cyclic loading processes // *Journal of mechanics of materials and structures* – 2020. – Vol. 15. – № 2. – P. 225–235.
15. Bondar V.S., Abashev D.R. Mathematical modeling of the monotonic and cyclic loading processes // *Strength of Materials* – 2020. – Vol. 52. – № 3. – pp. 366–373.
16. Bondar V.S., Abashev D.R. Refining the thermoplasticity theory for modeling of cyclic nonisothermic loading processes // *Journal of mechanics of materials and structures* – 2021. – Vol. 16. – № 4. – P. 501–510.
17. Bondar V.S., Abashev D.R. Modified theory of plasticity for monotonic and cyclic deformation processes // *Mechanics of Solids* – 2021. – Vol. 56. – № 1. – P. 4–12.
18. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. Микронапряжения в конструкционных материалах. – Л.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
19. Bondar V.S. Inelasticity. Variants of the theory. – New York: Begell House, 2013. – 194 p.
20. Нелинейная механика материалов / Ж. Бессон [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 397 с.
21. Bari S., Hassan T. An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation // *Int. J. of Plasticity*. – 2002. – Vol. 18. – P. 873–894.
22. Kan Q., Kang G. Constitutive model for uniaxial transformation ratcheting of super-elastic NiTi shape memory alloy at room temperature. // *Int. J. of Plasticity*. – 2009. – Vol. 26 (3). – P. 441–465. DOI: 10.1016/j.ijplas.2009.08.005
23. Chaboche J.-L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories // *Int. J. of Plasticity*. – 2008. – Vol. 24. – P. 1642–1692.
24. Rahman S.M., Hassan T., Corona E., Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure // *Int. J. of Plasticity*. – 2008. – Vol. 24. – P. 1756–1791.
25. Abdel-Karim M. Modified kinematic hardening rules for simulations of ratchetting // *Int. J. of Plasticity*. – 2009. – Vol. 25. – P. 1560–1587.
26. Abdel-Karim M. An evaluation for several kinematic hardening rules on prediction of multiaxial stress-controlled ratchetting. // *Int. J. of Plasticity*. – 2010. – Vol. 26. – P. 711–730.
27. Chaboche J.-L., Kanouté P., Azzouz F. Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions // *Int. J. of Plasticity*. – 2012. – Vol. 35. – P. 44–66.
28. 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.
29. Effect of dynamic strain aging on isotropic hardening in low cycle fatigue for carbon manganese steel / Z.Y. Huang, J.L. Chaboche, Q.Y. Wang, D. Wagner, C. Bathias // *Materials Science and Engineering*. – 2014. – A589. – P. 34–40.
30. Kang G., Kan Q. Constitutive modeling for uniaxial time-dependent ratcheting of SS304 stainless steel // *Mech. Mater.* – 2007. – Vol. 39. – P. 488–499.
31. Taleb L., Cailletaud G. Cyclic accumulation of the inelastic strain in the 304L SS under stress control at room temperature: Ratcheting or creep // *Int. J. Plasticity*. – 2011. – Vol. 27 (12). – P. 1936–1958.
32. Taleb L. About the cyclic accumulation of the inelastic strain observed in metals subjected to cyclic stress control // *Int. J. Plasticity*. – 2013. – Vol. 43. – P. 1–19.
33. Taleb L., Cailletaud G., Sai K. Experimental and numerical analysis about the cyclic behavior of the 304L and 316L stainless steels at 350 °C // *Int. J. Plasticity*. – 2014. – Vol. 61. – P. 32–48.
34. Armstrong P.J., Frederick C.O. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect // *CEGB Report No. RD/B/N/ 731*. – 1966.
35. Кадашевич Ю.И. О различных тензорно-линейных соотношениях в теории пластичности // *Исследования по упругости и пластичности*. – Л.: Изд-во ЛГУ. – 1967. – Вып.6. – С. 39–45.
36. Ишлинский А.Ю. Общая теория пластичности с линейным упрочнением // *Укр. матем. журн.* – 1954. – Т. 6, вып. 3. – С. 314–324.
37. Prager W. The theory of plasticity: A Survey of Recent Achievements // *Proc. Inst. Mech. Engrs.* – 1955. – London, 169.41.
38. Ohno N., Wang J.-D. Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, part 1: formulations and basic features for ratcheting behavior // *International Journal of Plasticity*. – 1993. – Vol. 9. – P. 375–390.
39. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Петров В.К. Сравнительный анализ вариантов пластичности при циклических нагружениях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № ». – 23–44.
40. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Фомин Д.Ю. Теории пластичности при сложном нагружении по плоским траекториям деформаций // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2021. – № 3. – С. 35–47.
41. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Фомин Д.Ю. Теории пластичности при сложном нагружении по пространственным траекториям деформаций // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2021. – № 4. – С. 41–48.

References

1. Volkov I.A., Korotkih Ju.G. Equations of state of viscoelastic media with damage [Uravnenija sostojanija vjaskouprugoplasticheskih sred s povrezhdenijami]. *Moscow, FIZMATLIT*, 2008, 424 p.
2. Applied theory of plasticity [Prikladnaja teoriya plastichnosti] / *Mitenkov F.M. [I dr.], M.: FIZMATLIT*, 2015, 284 p.
3. Applied theory of viscoplasticity: monograph [Prikladnaja teoriya vjaskoplastichnosti: monografija] / Volkov I.A. [i dr.], *N. Novgorod: Izd-vo NNGU*, 2015. 318 p.
4. Introduction to the continuum mechanics of a damaged medium [Vvedenie v kontinualnuju mehaniku povrejdennoi sredii] / Volkov I.A., Igumnov L.A., M.: *FIZMATLIT*, 2017, 304 p.
5. Modeling of nonlinear deformation and destruction of structures under conditions of multifactorial effects based on FEM [Modelirovanie nelineinogo deformirovanija i razrusheniya konstrukcii v usloviyah mnogofaktornih vozdeistvii na osnove MKE] / Kapustin S.A., Churilov Ju.A., Gorohov V.A., *N. Novgorod: Izd-vo NNGU*, 2015, 347 p.

6. Korotkih Ju.G. Description of the processes of accumulation of material damage during non-isothermal viscoplastic deformation [Opisanie processov nakopleniya povrejdennii materiala pri neizotermicheskom vjaskoplasticheskom deformirovanii]. *Problemi prochnosti*. 1985. № 1. pp. 18–23.
7. Volkov I.A., Igumnov L.A., Tarasov I.S., Shishulin D.N., Markova M.T. Modeling of fatigue durability of polycrystalline structural alloys under block asymmetric low-cycle loading [Modelirovanie ustalostnoi dolgovechnosti polikristallicheskih konstrukcionnih splavov pri blochnom nesimmetrichnom malociklovom nagrujenii]. *Problemi prochnosti i plastichnosti*, t.80, № 1, 2018. pp. 15–30.
8. Volkov I.A., Igumnov L.A., Shishulin D.N., Belov A.A. Evaluation of resource characteristics of polycrystalline structural alloys under cyclic thermomechanical loading [Ocenka resursnih karakteristik polikristallicheskih konstrukcionnih splavov pri ciklicheskom termomechanicheskom nagrujenii]. *Problemi prochnosti i plastichnosti*, t.83, № 4, 2021, pp. 481–504.
9. Ohno N., A constitutive model of cyclic plasticity with a non-hardening strain region. *J. Appli. Mech*, 1982, 49, pp. 721–727.
10. Chaboche J.L., Dang-Van k., and Cordier G., Modelization of the strain-memory-effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel. *SMIRT-5, Division L*, Berlin, 1979.
11. Wang Yu, Experimental and numerical evaluations of viscoplastic material behavior and multiaxial for austenitic and ferritic materials: dissertation of Dr. Ing. / Wang Yu, C., 2014, 163 P.
12. Bondar V.S., Abashev D.R. Some features of monotonic and cyclic loadings. Experiment and modeling. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 2, pp. 25–34.
13. Bondar V.S., Abashev D.R., Fomin D.Yu. A variant of the thermoplasticity theory for monotonic and cyclic processes of nonisothermal loads. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 2, pp. 28–36.
14. Bondar V.S., Abashev D.R. Refining the thermoplasticity theory for modeling monotonic and cyclic loading processes. *Journal of mechanics of materials and structures*, 2020, Vol. 15, № 2, pp. 225–235.
15. Bondar V.S., Abashev D.R. Mathematical modeling of the monotonic and cyclic loading processes. *Strength of Materials*, 2020, Von. 52, № 3, pp. 366–373.
16. Bondar V.S., Abashev D.R. Refining the thermoplasticity theory for modeling of cyclic nonisothermic loading processes. *Journal of mechanics of materials and structures*, 2021, Vol. 16, № 4, pp. 501–510.
17. Bondar V.S., Abashev D.R. Modified theory of plasticity for monotonic and cyclic deformation processes. *Mechanics of Solids*, 2021, Vol. 56, № 1, pp. 4–12.
18. Kadashevich Ju.I., Novozhilov V.V. Mikronapryazheniya v konstrukcionnyh materialah, L. *Mashinostroenie*, 1990. 224 p.
19. Bondar V.S. Inelasticity. Variants of the theory. – *New York: Begell House*, 2013. – 194 p.
20. Nelinejnaya mekhanika materialov / Besson Zh. [i dr.], Sankt-Peterburg: *Izd-vo Politekhn. un-ta*, 2010, 397 s.
21. Bari S., Hassan T. An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation. *Int. J. of Plasticity*. – 2002. – Vol. 18. – pp. 873–894.
22. Kan Q., Kang G. Constitutive model for uniaxial transformation ratcheting of super-elastic NiTi shape memory alloy at room temperature. *Int. J. of Plasticity*. – 2009. – Vol. 26 (3). – pp.441–465. doi: 10.1016/j.ijplas.2009.08.005
23. Chaboche J.-L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *Int. J. of Plasticity*. – 2008. – Vol. 24. – pp.1642–1692.
24. Rahman S.M., Hassan T., Corona E., Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure. *Int. J. of Plasticity*. – 2008. – Vol. 24. – pp.1756–1791.
25. Abdel-Karim M. Modified kinematic hardening rules for simulations of ratchetting. *Int. J. of Plasticity*. – 2009. – Vol. 25. – pp. 1560–1587.
26. Abdel-Karim M. An evaluation for several kinematic hardening rules on prediction of multiaxial stress-controlled ratchetting. *Int. J. of Plasticity*. – 2010. – Vol. 26. – pp. 711–730.
27. Chaboche J.-L., Kanouté P., Azzouz F. Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions. *Int. J. of Plasticity*. – 2012. – Vol. 35. – pp. 44–66.
28. 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. – pp.1863–1889.
29. 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. – pp. 34–40.
30. Kang G., Kan Q. Constitutive modeling for uniaxial time-dependent ratcheting of SS304 stainless steel. *Mech. Mater.*. – 2007. – Vol. 39. – pp.488–499.
31. Taleb L., Cailletaud G. Cyclic accumulation of the inelastic strain in the 304L SS under stress control at room temperature: Ratcheting or creep. *Int. J. Plasticity*. – 2011. – Vol. 27 (12). – pp.1936–1958.
32. Taleb L. About the cyclic accumulation of the inelastic strain observed in metals subjected to cyclic stress control. *Int. J. Plasticity*. – 2013. – Vol. 43. – pp.1–19.
33. Taleb L., Cailletaud G., Sai K. Experimental and numerical analysis about the cyclic behavior of the 304L and 316L stainless steels at 350 °C. *Int. J. Plasticity*. – 2014. – Vol. 61. – pp.32–48.
34. Armstrong P.J., Frederick C.O. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. *CEGB Report No. RD/B/N/ 731*. – 1966.
35. Kadashevich Ju.I. O razlichnyh tenzorno-linejnyh sootnosheniyah v teorii plastichnosti. Issledovaniya po uprugosti i plastichnosti. – L.: *Izd-vo LGU*, 1967. Vyp. 6. pp. 39–45.
36. Ishlinskij A.Ju. Obschaya teoriya plastichnosti s linejnym uprochneniem. *Ukr. matem. zhurn.* – 1954. – T. 6, vyp. 3, pp. 314–324.
37. Prager W. The theory of plasticity: A Survey of Recent Achievements. *Proc. Inst. Mech. Engrs.* – 1955. – London, 169.41.
38. Ohno N., Wang J.-D. Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, part 1: formulations and basic features for ratcheting behavior. *International Journal of Plasticity*. – 1993. – Vol. 9. – pp. 375–390.
39. Bondar V.S., Abashev D.R., Petrov V.K. Comparative analysis of variants of plasticity theories under cyclic loading. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 2, pp. 23–44.
40. Bondar V.S., Abashev D.R., Fomin D.Ju. Theories of plasticity under complex loading along flat trajectories of deformations. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2021, no. 3, pp. 35–47.
41. Bondar V.S., Abashev D.R., Fomin D.Ju. Theories of plasticity under complex loading along spatial trajectories of deformations. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2021, no. 4, pp. 41–48.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Financing. The study was not sponsored.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.