УДК 539.3

И.А. Волков[1], А.И. Волков[1], Д.А. Казаков[2], Ю.Г. Коротких[1], И.С. Тарасов[1]

[1]Волжская государственная академия водного транспорта, Нижний Новгород, Россия
[2]Научно-исследовательский институт механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТОВ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ

Развита математическая модель неупругого деформирования конструкционных сталей, описывающая процессы термовязкопластического деформирования с учетом взаимного влияния эффектов пластичности и ползучести. Разработан алгоритм интегрирования определяющих соотношений термовязкопластичности, заключающийся в формулировке определяющих соотношений в приращениях, зависящих от выбранного шага по времени. При прохождении сложных участков траектории деформирования временной шаг может корректироваться в течение всего расчетного времени процесса при условии устойчивости вычислений. Напряжения, пластические деформации и деформации ползучести определяются интегрированием определяющих соотношений термоползучести методом Рунге-Кутта с коррекцией девиатора напряжений и последующим определением напряжений согласно уравнениям термопластичности с учетом средней деформации ползучести в каждый следующий момент времени. Проведены экспериментальные исследования взаимного влияния процессов ползучести, пластичности и эффектов высокотемпературных выдержек на примере стали 12Х18Н9. Методом численного моделирования на ЭВМ кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) лабораторных образцов и сравнения полученных результатов с данными натурных экспериментов проведена аттестация развитой модели термовязкопластичности и алгоритма интегрирования определяющих соотношений, позволившая сделать вывод о достоверности модельных представлений и методики определения материальных параметров при совместном действии механизмов усталости и ползучести. Проведено сравнение результатов численного и натурного экспериментов по растяжению лабораторных образцов из стали 12Х18Н9 при различных историях изменения температуры и механической деформации. Показано, что развитая модель термовязкопластичности качественно и количественно описывает основные эффекты неупругого деформирования конструкционных сталей при различных историях изменения механической деформации и температуры. Сделан вывод о достоверности определяющих соотношений термовязкопластичности и точности вышеописанной методики интегрирования.

Ключевые слова: пластичность, ползучесть, базовый эксперимент, напряженно-деформированное состояние, траектория нагружения, вид напряженного состояния, сложное нагружение, материальные параметры.

I.A. Volkov[1], A.I. Volkov[1], D.A. Kazakov[2], Yu.G. Korotkikh[1], I.S. Tarasov[1]

[1]Volga State Academy of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russian Federation
[2]Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University,
Nizhny Novgorod, Russian Federation

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATIONS OF VISCO-PLASTIC DEFORMATION IN STRUCTURAL STEELS CONSIDERING MUTUAL INFLUENCE OF PLASTICITY AND CREEP EFFECTS

This paper considers the developed mathematical model of inelastic deformation in structural steels, describing thermoviscoplastic deformation taking into account mutual influence of plasticity and creep effects. An integration algorithm for constitutive relations of thermoviscoplasticity has been developed. It consists in the formulation of constitutive relations in increments, depending on the selected time step. In difficult areas of deformation paths, time step can be adjusted throughout the whole estimation time in case of stability calculations. Stresses, plastic deformations and creep deformations are determined by integrating the defining relations of thermal creep by Runge-Kutta method with the correction of stress deviator and subsequent determination of stress according to thermal plasticity equations with regard to the average creep strain at the next sampling time. Experimental studies of influence between creep processes and plasticity under high temperature using 12H18N9 steel have been conducted. By numerical computer simulation of stress-strain state (SSS) kinetics in laboratory samples and by comparing the obtained results with field experiments, the authors carried out certification of the developed thermoviscoplastic model and integration algorithm of constitutive relations. All of these led to the conclusion about the reliability of model concepts and methods for determining material parameters under joint actions of fatigue and creep mechanisms. The authors have compared computer and physical tensile experiments of laboratory 12H18N9 steel samples with different histories of changes in temperature and mechanical deformation. It is shown that the developed thermoviscoplastic model qualitatively and quantitatively describes main effects of inelastic deformation in structural steels with different histories of mechanical deformation and changes in temperature. It is concluded that the defining relations of thermoviscoplasticity are reliable, and the above methods of integration are accurate.

Keywords: plasticity, creep, basic experiment, stress-strain state, the trajectory of loading, type of stress state, complex loading, material parameters.

Введение

Ресурс элементов конструкций, работающих в условиях повышенных температур ($T > 0{,}5\ T_{пл}$, $T_{пл}$ – температура плавления) и циклических механических воздействий, определяется в основном процессами малоцикловой усталости и накопления повреждений в результате ползучести, которые приводят к одному из наиболее опасных типов разрушения – хрупкому разрушению упругопластических материалов [1–3].

Особенностью разрушения элементов конструкций в результате действия МЦУ является постепенный характер накопления повреждений от циклического действия пластических деформаций в зонах конструктивной концентрации напряжений при большом общем запасе прочности. Малоцикловая усталость является доминирующей при скоростях деформации 10^{-3}–10^{-1} с$^{-1}$ и температурах, при которых реологическими эффектами (ползучестью материала) можно пренебречь, и характеризуется сравнительно небольшим числом циклов до усталостного разрушения ($N_f \leq 10^5$). В случае циклических изменений температуры и механической нагрузки имеем дело с термомеханической усталостью (ТМУ), которая более разрушительна, чем изотермическая малоцикловая усталость. Причем сокращение долговечности тем больше, чем больше разность температур в цикле [4–8, 16]. Сочетание циклов термического и силового воздействий вызывает ряд специфических особенностей в процессах циклического упругопластического деформирования и накопления повреждений, в связи с чем ТМУ является предметом самостоятельного изучения.

Зависимость долговечности материала от длительности (частоты) цикла и от наличия выдержек напряжения в цикле, протекающих на фоне повышенных постоянных или меняющихся температур ($T = 0{,}35 - 0{,}7T_{\text{пл}}$), обусловлена развивающимися деформациями ползучести. Разрушение при ползучести является межкристаллическим в противоположность транскристаллическому разрушению в процессе усталости.

При термоциклическом нагружении и $T > 0{,}5T_{\text{пл}}$ одновременно протекают процессы накопления повреждений в результате малоцикловой усталости и ползучести. Эти процессы взаимодействуют друг с другом, существенно влияя на ресурс элемента конструкции. Одновременное развитие в цикле изменения нагрузки процессов поврежденности в результате малоцикловой усталости и ползучести оказывает заметное влияние на механизмы малоциклового разрушения и длительной прочности.

Деформации ползучести и инициируемый ими процесс повреждаемости материала могут развиваться как в процессе выдержки под нагрузкой, так и при монотонном процессе нагружения или разгрузки, происходящих с достаточно низкой скоростью. Важными факторами,

влияющими на ресурс материала при совместном действии процессов МЦУ и ползучести является форма цикла нагружения, асимметрия и вид напряжений, вид напряженного состояния на фоне которых развиваются деформации ползучести. В реальных условиях длительные циклы нагружения могут быть достаточно сложными, включая участки активного нагружения и разгрузки, протекающие с различными скоростями, выдержками в промежуточных точках цикла. С целью изучения данных процессов были проведены экспериментальные исследования по выявления наиболее характерных режимов нагружения [4–8]. Указанные эксперименты показывают, что наличие времени выдержки при растяжении более 1–2 минут при повышенных температурах может вызвать резкое уменьшение усталостной долговечности (более чем в 5 раз) [4, 6] и изменение механизма разрушения с внутризеренного на межзеренное. Времена выдержки при сжатии или циклы, включающие равные времена выдержек при растяжении и сжатии, приводят к меньшим повреждениям, чем выдержки при растяжении. Разрушение в этом случае внутризеренное. При цикле «медленно-быстро», когда малая скорость деформации приходится на растягивающую часть цикла, также наблюдается снижение долговечности (по числу циклов до разрушения) по сравнению с симметричным циклированием и переходом на межзеренное разрушение. В [6] приведена таблица характерных циклов при взаимодействии процессов ползучести и малоцикловой усталости.

В связи с этим становится необходимой разработка новых методов оценки ресурса элементов конструкции на базе соответствующих уравнений термовязкопластичности, уравнений накопления повреждений и критериев разрушения со всесторонним их обоснованием посредством проведения соответствующих натурных и численных экспериментов на лабораторных образцах и численного анализа процессов деформирования и разрушения элементов конструкций в эксплуатационных условиях.

В настоящей работе рассматривается проблема математического моделирования процессов термовязкопластического деформирования конструкционных сталей, алгоритма интегрирования определяющих соотношений, методики определения материальных параметров и скалярных функций определяющих соотношений термовязкопластичности, численного моделирования на ЭВМ кинетики НДС лабораторных

образцов и сравнения полученных результатов с данными натурных экспериментов при совместном действии механизмов усталости и ползучести.

1. Определяющие соотношения термовязкопластичности

1.1. Модель термовязкопластичности

Определяющие соотношения термовязкопластичности базируются на следующих основных положениях [2, 9, 10, 17–20]:

– тензоры деформаций e_{ij} и скоростей деформаций $\dot{e}_{ij}$ представляют сумму «мгновенной» и «временной» составляющих. «Мгновенная» составляющая тензора деформаций включает упругие деформации e_{ij}^{e}, $\dot{e}_{ij}^{e}$ (не зависящие от истории нагружения и определяющиеся конечным состоянием процесса), пластические – e_{ij}^{p}, $\dot{e}_{ij}^{p}$ (зависящие от истории процесса нагружения) и дефомации ползучести – e_{ij}^{c}, $\dot{e}_{ij}^{c}$. Приращения пластических компонент тензора деформаций не зависят от «временной» истории изменения температуры и внешних нагрузок в отличие от деформаций ползучести e_{ij}^{c}, $\dot{e}_{ij}^{c}$;

– 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}^{p};

– справедлив принцип градиентальности вектора скорости пластических деформаций к поверхности текучести в точке нагружения;

– изменение объема тела упруго $e_{ii}^{p} = e_{ii}^{c} \equiv 0$;

– в пространстве напряжений существует поверхность ползучести радиусом C_c, вектор скорости деформации ползучести к которой направлен по нормали к ней в точке нагружения;

– рассматриваются начально изотропные среды;

– учитывается только анизотропия, вызванная процессами необратимого деформирования.

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

$$\sigma=3K[e-\alpha(T-T_0)],\ \sigma_{ij}=2Ge'^{e}_{ij},\ e'^{e}_{ij}=e'_{ij}-e'^{p}_{ij}-e'^{c}_{ij},$$

$$\dot{\sigma}=3K[\dot{e}-(\overline{\alpha\dot{T}})]+\dot{K}\sigma/K,\ \dot{\sigma}'_{ij}=2G\dot{e}'^{e}_{ij}+\dot{G}\sigma'_{ij}/G, \qquad (1)$$

здесь $\sigma,\dot{\sigma},e,\dot{e}$ – шаровые, а $\sigma'_{ij},\dot{\sigma}'_{ij},e'_{ij},\dot{e}'_{ij}$ – девиаторные составляющие тензоров напряжений σ_{ij}, деформаций e_{ij} и их скоростей $\dot{\sigma}_{ij}$, $\dot{e}_{ij}$ соответственно; T – температура; T_0 – начальная температура; $K(T)$ – модуль объемного сжатия; $G(T)$ – модуль сдвига; $\alpha(T)$ – коэффициент линейного температурного расширения материала.

Эффекты монотонного и циклического деформирования в пространстве напряжений учитываются с помощью поверхности текучести, уравнение которой имеет вид

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

Для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве напряжений вводится поверхность циклической «памяти». Уравнение поверхности «памяти», позволяющее при расчетах отделить монотонные процессы деформирования от циклических, имеет вид:

$$F_\rho=\rho^p_{ij}\rho^p_{ij}-\rho^2_{\max}=0 \qquad (3)$$

где $\rho_{\max}$ – максимальный за историю нагружения модуль переменной ρ^p_{ij}.

Принимается эволюционное уравнение для радиуса поверхности текучести вида [2]:

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

$$C_p=C_p^0+\int_0^t\dot{C}_p dt,\ \dot{\chi}=\left(\frac{2}{3}\dot{e}^p_{ij}\dot{e}^p_{ij}\right)^{1/2},\ \chi_m=\int_0^t\dot{\chi}H\left(F_\rho\right)dt,\ \chi=\int_0^t\dot{\chi}dt \qquad (5)$$

$$q_\chi=\frac{q_2A\psi_1+(1-A)q_1}{A\psi_1+(1-A)},\ Q_s=\frac{Q_2A\psi_2+(1-A)Q_1}{A\psi_2+(1-A)},\ 0\le\psi_i\le1\ (i=1,2), \qquad (6)$$

$$A=1-\cos^2\theta,\ \cos\theta=n^e_{ij}n^s_{ij},\ n^e_{ij}=\frac{\dot{e}'_{ij}}{(\dot{e}'_{ij}\dot{e}'_{ij})^{1/2}},\ n^s_{ij}=\frac{S_{ij}}{(S_{ij}S_{ij})^{1/2}}, \qquad (7)$$

$$H(F_\rho)=\begin{Bmatrix}1, F_\rho=0\wedge\rho_{ij}^p\dot{\rho}_{ij}^p>0\\ 0, F_\rho<0\vee\rho_{ij}^p\dot{\rho}_{ij}^p\le 0\end{Bmatrix},\ \Gamma(F_\rho)=1-H(F_\rho). \qquad (8)$$

Здесь q_1, q_2, q_3 – модули изотропного упрочнения, соответствующие монотонным лучевым путям нагружения (q_1), излому траектории деформирования на 90° (q_2), температурному изменению радиуса поверхности текучести (q_3); a – постоянная, определяющая скорость процесса стабилизации формы петли гистерезиса циклического деформирования материала; Q_s – стационарное значение радиуса поверхности текучести при данных $\rho_{\max}$ и T; χ и χ_m – длины траекторий пластического деформирования материала при циклическом и монотонном нагружениях; C_p^0 – начальное значение радиуса поверхности текучести.

Первый член уравнения (4) описывает изотропное упрочнение в результате монотонного пластического деформирования $\left(H\left(F_\rho\right)=1\right.$ и $\left.\Gamma\left(F_\rho\right)=0\right)$, второй член – циклическое упрочнение материала $\left(H\left(F_\rho\right)=0\right.$ и $\left.\Gamma\left(F_\rho\right)=1\right)$, а третий – изменение радиуса поверхности текучести при изменении температуры. В целом уравнение (4) описывает локальную анизотропию пластического упрочнения в зависимости от параметра A, характеризующего отклонение вектора догрузки от нормали к поверхности текучести в точке нагружения. Операторы $H\left(F_\rho\right)$ и $\Gamma\left(F_\rho\right)$ позволяют автоматически провести разделение процессов монотонного и циклического деформирования.

Уравнение для смещения поверхности текучести основано на гипотезе А.А. Ильюшина, заключающейся в том, что упрочнение зависит от истории деформирования лишь на некоторой ближайшей части траектории (запаздывание векторных свойств). Внутренняя переменная ρ_{ij}^p, учитывающая анизотропию упрочнения пластического деформирования, удовлетворяет эволюционному уравнению [2]:

$$\dot{\rho}_{ij}^p=g_1^p\dot{e}_{ij}^p-g_2^p\rho_{ij}^p\dot{\chi}-g_3^p\rho_{ij}^p\dot{T},\ \rho_{ij}^p=\int_0^t\dot{\rho}_{ij}^p dt, \qquad (9)$$

где $g_1^p > 0, g_2^p > 0$ и $g_3^p > 0$ – модули анизотропного упрочнения. Первый и второй члены этого уравнения отвечают за анизотропную часть деформационного упрочнения, а третий – за изменение ρ_{ij}^p в результате воздействия температуры T.

Уравнение (9) описывает известный пространственный эффект Баушингера и анизотропию векторных свойств при изменении направления деформирования (изломе траектории деформирования). Введение второго члена в это соотношение моделирует исчезающую память внутренней переменной ρ_{ij}^p (скорость изменения ρ_{ij}^p является разностью между двумя составляющими $g_1^p \dot{e}_{ij}^p$ и $g_2^p \rho_{ij}^p \dot{\chi}$).

Для характеристики поведения поверхности «памяти» необходимо сформулировать эволюционное уравнение для $\rho_{\max}$:

$$\dot{\rho}_{\max} = \frac{(\rho_{ij}^p \dot{\rho}_{ij}^p) H(F_\rho)}{(\rho_{mn}^p \rho_{mn}^p)^{1/2}} - g_2 \rho_{\max} \dot{\chi} - g_3 \rho_{\max} \dot{T} . \qquad (10)$$

Здесь и далее для любой величины $\dot{B}$, заключенной в угловые скобки $\langle\ \rangle$, выполняются условия $\langle \dot{B} \rangle = \begin{cases} \dot{B} & \text{при } \dot{B} > 0, \\ 0 & \text{при } \dot{B} \le 0. \end{cases}$

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

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda S_{ij} . \qquad (11)$$

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

Материальные параметры, входящие в выражения (4)–(10), находятся из различных экспериментов:

– q_1, q_3, g_1^p, g_2^p и g_3^p – из опытов на одноосное растяжение-сжатие цилиндрических трубчатых образцов по специальным циклическим программам испытаний [2];

– Q_1 – из испытаний на блочное циклическое симметричное нагружение с заданной амплитудой деформаций в каждом блоке до стабилизации петли гистерезиса на каждом уровне амплитуд деформаций;

– параметр a – из условия наилучшей аппроксимации экспериментальных закономерностей стремления C_p к установившемуся состоянию;

– q_2 – из эксперимента на сложное нагружение: растяжение до некоторого значения e_{11}^{p*} и последующее кручение с построением траектории напряжений в пространстве $\sigma_{11}-\sigma_{12}$.

– Q_2 – из эксперимента на двухблочное циклическое деформирование с одинаковой заданной интенсивностью амплитуды деформаций до стабилизации петли гистерезиса в каждом блоке: первый блок – это симметричное циклическое растяжение-сжатие, второй – последующее циклическое симметричное нагружение образца кручением.

Если величина напряжений, температура и скорость нагружения таковы, что эффекты ползучести существенны, параметры процесса деформирования материала должны определиться с учетом процесса ползучести на этапе нагружения. Это влияние учитывается при определении χ_p с учетом средней скорости деформации ползучести $\dot{e}_{ij}^c$ на этапе нагружения Δt. Для установления связи между тензором скорости деформации ползучести $\dot{e}_{ij}^c$ и девиатором напряжений σ'_{ij} предполагается, что уравнение потенциальной функции ползучести имеет вид

$$F_c = \sigma'_{ij}\sigma'_{ij} - C_c^2 = 0, \tag{12}$$

где σ'_{ij} – совокупность напряженных состояний, отвечающих (с определенным допуском) начальной скорости ползучести (рис. 1), а $C_c = C_c(\chi_c, T)$ – экспериментально определяемая скалярная функция переменных χ_c и T.

Из условия градиентальности вектора скорости деформации ползучести к поверхности (12), следует:

$$\dot{e}_{ij}^c = \lambda_c \left(\frac{\sigma_u - C_c}{C_c} \right)^k \frac{\sigma'_{ij}}{\sigma_u}, \tag{13}$$

где $\sigma_u = \left(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}\right)^{1/2}$ – интенсивность тензора напряжений; λ_c – коэффициент пропорциональности (является функцией температуры и параметра χ_c); k – экспериментально определяемый параметр материала.

Интенсивность тензора скорости деформации ползучести имеет вид

$$\dot{e}_u^c = \left(\dot{e}_{ij}^c \dot{e}_{ij}^c\right) = \lambda_c \left(\frac{\sigma_u - C_c}{C_c}\right)^k. \qquad (14)$$

С учетом этого длина траектории деформации ползучести примет вид

$$\dot{\chi}_c = \sqrt{\frac{2}{3}}\left(\dot{e}_{ij}^c \dot{e}_{ij}^c\right)^{1/2} = \sqrt{\frac{2}{3}}\dot{e}_u^c = \sqrt{\frac{2}{3}}\lambda_c \left(\frac{\sigma_u - C_c}{C_c}\right)^k, \quad \chi_c = \int_0^t \dot{\chi}_c dt. \qquad (15)$$

Зависимость χ_c от времени процесса *t* при постоянной интенсивности тензора напряжений $\sigma_u = \text{const}$ при многоосном деформировании по лучевой траектории имеет вид представленный на рис. 1.

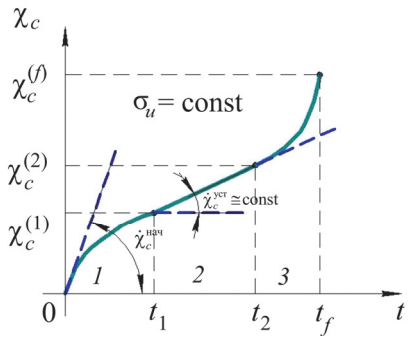


Рис. 1. Зависимость χ_c от времени процесса *t* (кривая ползучести) при постоянной интенсивности тензора напряжений $\sigma_u = \text{const}$ при многоосном деформировании по лучевой траектории

На кривой $\chi_c \sim t$ (см. рис. 1) с определенной долей условности можно выделить три участка:

1 – участок неустановившейся ползучести (0 – $\chi_c^{(1)}$) – скорость деформации ползучести убывает;

2 – участок установившейся ползучести ($\chi_c^{(1)}$ – $\chi_c^{(2)}$) – скорость деформации ползучести приблизительно постоянна $\dot{\chi}_c \cong \text{const}$;

3 – участок неустановившейся ползучести ($\chi_c > \chi_c^{(2)}$) – скорость деформации ползучести резко возрастает (предшествует разрушению).

Длина участков *1–3* зависит от величины σ_u.

При одноосном растяжении-сжатии лабораторного образца имеем

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_{11}; \; C_c = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_c; \; \frac{\sigma_u - C_c}{C_c} = \frac{\sigma_{11} - \sigma_c}{\sigma_c},$$

$$\dot{e}_{11}^{c}=\frac{\sqrt{2}}{3}\lambda_c\left(\frac{\sigma_{11}-\sigma_c}{\sigma_c}\right)^k;\ \chi_c^{(1)}=e_{11}^{c(1)};\ \chi_c^{(2)}=e_{11}^{c(2)};\ \dot{\chi}_c=\dot{e}_{11}^{c}, \qquad (16)$$

где σ_c – минимальное значение напряжения σ_{11}, ниже которого процессом ползучести можно пренебречь (функция температуры *T*), и диаграмма $\chi_c \sim t$ эквивалентна диаграмме $e_{11}^{c} \sim t$.

На участке 2 ($e_{11}^{c(1)} \le e_{11}^{c} \le e_{11}^{c(2)}$)

$$\lambda_c^{(2)}=\sqrt{\frac{3}{2}}\frac{\dot{e}_{11}^{\text{уст}}}{\left(\frac{\sigma_{11}-\sigma_c}{\sigma_c}\right)^k}. \qquad (17)$$

На участке 1 ($0 \le e_{11}^{c} \le e_{11}^{c(1)}$),

$\dot{e}_{11}^{c}=\dot{e}_{11}^{\text{нач}}$, при $e_{11}^{c}=0$,

$\dot{e}_{11}^{c}=\dot{e}_{11}^{уст}$, при $e_{11}^{c}=e_{11}^{c(1)}$.

Из этих условий получаем

$$\lambda_c^{(1)}=\lambda_c^{(2)}\left(\frac{\dot{e}_{11}^{нач}}{\dot{e}_{11}^{уст}}\right)^{\frac{e_{11}^{c}-e_{11}^{c(1)}}{e_{11}^{c(1)}}}. \qquad (18)$$

Обобщая полученные соотношения на неодномерный случай, будем иметь

$$\dot{e}_{ij}^{c}=\lambda_c\left(\frac{\sigma_u-C_c}{C_c}\right)^k\frac{\sigma'_{ij}}{\sigma_u}, \qquad (19)$$

где $\lambda_c=\begin{cases}0, \sigma_u \le C_c \vee \chi_c=0,\\ \lambda_c^{(1)}, 0 \le \chi_c \le \chi_c^{(1)},\\ \lambda_c^{(2)}, \chi_c^{(1)} \le \chi_c \le \chi_c^{(2)}.\end{cases}$

На участке 3 (начало разрушения)

$$\dot{e}_{ij}^{c}=\frac{\lambda_c^{(2)}}{(1-\omega)}r_c\left(\frac{\sigma_u-C_c}{C_c}\right)^k\frac{\sigma'_{ij}}{\sigma_u}, \qquad (20)$$

где ω – поврежденность материала, а r_c – параметр материала.

Уравнения (12)–(20) описывают неустановившиеся и установившиеся участки кривой ползучести при разных условиях напряжений и основные эффекты процесса ползучести при знакопеременном нагружении. Связь уравнений ползучести (12)–(20) с уравнениями (1)–(11), описывающими «мгновенные» пластические деформации, осуществляется на этапе нагружения через девиатор напряжений σ'_{ij} и соответствующий алгоритм определения $\dot{e}^c_{ij}$ и $\dot{e}^p_{ij}$ на этапе нагружения путем определенных соотношений между «временными» и «мгновенными» скалярными и тензорными величинами.

В общем случае напряжения, пластические деформации и деформации ползучести определяются интегрированием уравнений термоползучести (12)–(20) четырехточечным методом Рунге–Кутта с коррекцией девиатора напряжений и последующим определением напряжений согласно уравнениям термопластичности (1)–(11) с учетом средней скорости деформации ползучести в момент времени: $t^{n+1} = t^n + \Delta t$.

1.2. Методика определения параметров определяющих соотношений МПС

Материальные параметры уравнений МПС определяются из базовых экспериментов. Основные типы базовых экспериментов – изотермические при постоянных базовых температурах T_j. Типы образцов – цилиндрический трубчатый и цилиндрический сплошной. Выбранные типы образцов должны обеспечивать однородное распределение полей напряжений деформаций и температур в пределах рабочей части, исключают возможность потери устойчивости и формоизменении образца при знакопеременном нагружении, максимально исключают влияние концентраторов на напряженно-деформированное состояние при переходе от рабочей части образца к утолщенным местам.

Методика определения материальных параметров определяющих соотношений термовязкопластичности при совместных процессах ползучести и пластичности подробно изложена в [11].

1.3. Интегрирование определяющих соотношений МПС

Определение основных характеристик процесса вязкопластического деформирования конструкционных материалов (параметров состояния), которые в общем случае описываются тензорами

$\sigma_{ij}, e_{ij}, e_{ij}^p, \rho_{ij}^p, e_{ij}^c$ и скалярами χ, χ_c, C_p, C_c и T может осуществляться двумя способами:

– первый способ заключается в интегрировании определяющих соотношений по времени, для выполнения которого можно использовать любой из методов решения задачи Коши. Это достаточно точный метод нахождения решений дифференциальных уравнений, но при решении краевых задач возникают сложности из-за значительного увеличения времени вычисления процесса;

– второй способ при соответствующей формулировке определяющих соотношений МПС и линеаризации алгоритма определения λ сводится к написанию определяющих соотношений МПС в приращениях, которые зависят от выбранного шага Δt. Шаг по времени Δt может корректироваться при прохождении сложных участков траектории деформирования в течение всего расчетного времени при условии устойчивости вычислений. Такой подход [2, 9, 10] наиболее удобен при решении краевых задач механики деформируемого твердого тела и используется в данной работе.

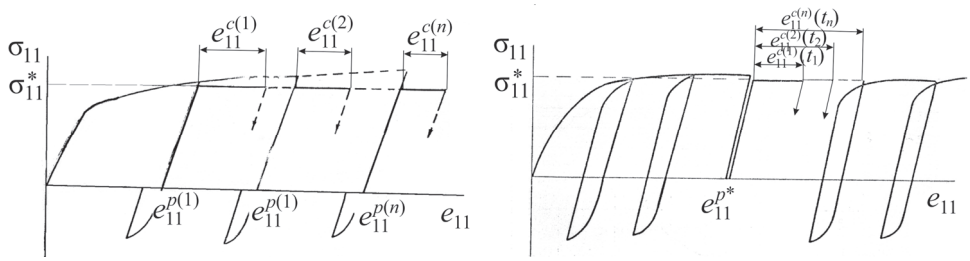
В общем случае напряжения, пластические деформации и деформации ползучести определяются интегрированием уравнений термоползучести (12)–(20) четырехточечным методом Рунге–Кутта с коррекцией девиатора напряжений и последующим определением напряжений согласно уравнениям термопластичности (1)–(11) с учетом средней скорости деформации ползучести в момент времени: $t^{n+1} = t^n + \Delta t$.

2. Численные и экспериментальные результаты

2.1. Экспериментальные исследования

В неизотермическом цикле наряду с пластическими деформациями, возникающими на нестационарных участках, появляются деформации ползучести, соответствующие зонам выдержки при $T = \text{const}$ и $\sigma_{11} = \text{const}$. В этих же условиях происходит восстановление механических свойств материала за счет процессов рекристаллизации и возврата. В модели термовязкопластичности с трансляционно-изотропным упрочнением [2, 9, 10] взаимное влияние деформаций e_{ij}^p и e_{ij}^c можно учесть, вводя зависимость скалярных функций пластичности C_p и q_χ от параметров, описывающих процесс ползучести, и наобо-

рот. Вид функциональной зависимости и количественная оценка этих параметров могут быть определены с помощью двух серий экспериментов (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Схема реализации экспериментов по взаимному влиянию эффектов пластичности и ползучести: *а* – влияние пластичности на ползучесть; *б* – влияние ползучести на пластичность

Первая серия: влияние пластичности на ползучесть. При $T = \text{const}$ ряд образцов по программе базового эксперимента в пластичности [12] нагружают до разной степени пластической деформаций: $e_{11}^{p(1)}$, $e_{11}^{p(2)}$ … $e_{11}^{p(n)}$. Далее осуществляется выдержка образца при фиксированном напряжении σ_{11}^{*} в течение определенного времени t^{*}, за которое накапливается необратимая деформация ползучести $e_{11}^{c(n)}$ (рис. 2, *а*). Такой эксперимент позволяет количественно оценить величину накопленной деформации ползучести за время t^{*} в зависимости от предшествующей пластической деформации.

Вторая серия: влияние ползучести на пластичность. При $T = \text{const}$ образцы нагружают по программе базового эксперимента [12] до определенной степени пластической деформации $e_{11}^{p*} < 0{,}02$, а затем разгружают. Выбирается напряжение $\sigma_{11}^{*} = \text{const}$ для всех образцов такое, что $\sigma_{11}^{*} < \sigma_T$, где σ_T – предел текучести при $e_{11}^{p} = e_{11}^{p*}$. При данной нагрузке за время t_1, t_2 … t_n снимаются диаграммы ползучести. Далее образцы продолжают испытывать по программе базового эксперимента [12] (рис. 2, *б*).

Данные опыты позволяют оценить изменение C_p и ρ_{11}^p в зависимости от степени накопленной предшествующей деформации ползучести e_{11}^c. По схеме, представленной на рис. 2, *б*, было проведено три опыта. Образцы – конструкционная сталь I2XI8H9. Температура испытания $T = 650$ °С.

По программе базового эксперимента [12] в пластичности все три образца деформировались до $e_{11}^{p*} = 0{,}012$, а затем два образца нагружались до $\sigma_{11}^* = 170$ МПа и выдерживались под нагрузкой: 1-й образец – 19 мин, 2-й – 25 мин. За это время величина накопленной деформации ползучести составила: для 1-го образца – $e_{11}^c = 0{,}0125$, для 2-го – $e_{11}^c = 0{,}025$. Третий образец выдерживался при нулевой нагрузке ($\sigma_{11} = 0$) – 19 мин (чистый отжиг). Значения C_p и ρ_{11}^p до (вариант *а* на рис. 3–5) и после выдержек (вариант *б* на рис. 3–5) под нагрузкой для первых двух образцов приведены на рис. 3, 4 и для третьего образца – на рис. 4. Значение ρ_{11}^p для всех трех случаев после выдержек составило порядка 20 МПа. Результаты исследований позволяют сделать вывод, что незначительные деформации ползучести ($e_{11}^c \le 0{,}025$) не оказывают существенного влияния на характер последующего пластического деформирования. Изменение параметров C_p, ρ_{11}^p и δ_{11} (мера эффекта Баушингера) следует отнести за счет процессов рекристаллизации, протекающих при данной температуре.

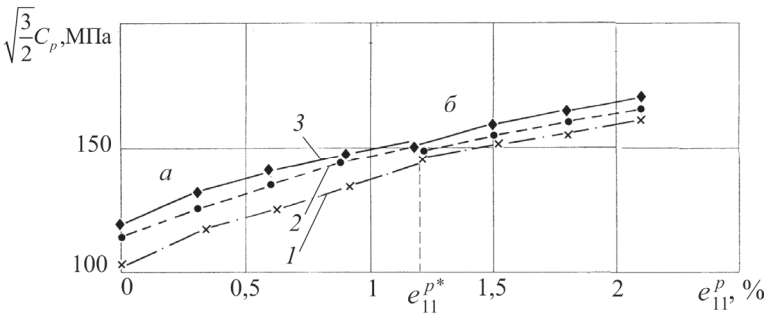


Рис. 3. Зависимость радиуса поверхности текучести и координат ее центра от уровня пластической деформации: *1* – образец № 1, *2* – образец № 2, *3* – образец № 3

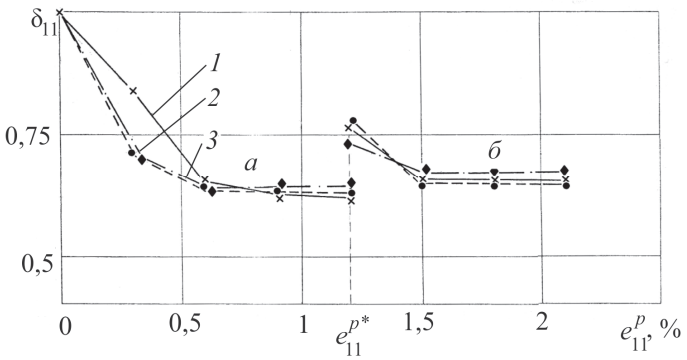


Рис. 4. Зависимость меры эффекта Баушингера от уровня пластической деформации: *1* – образец № 1, *2* – образец № 2, *3* – образец № 3

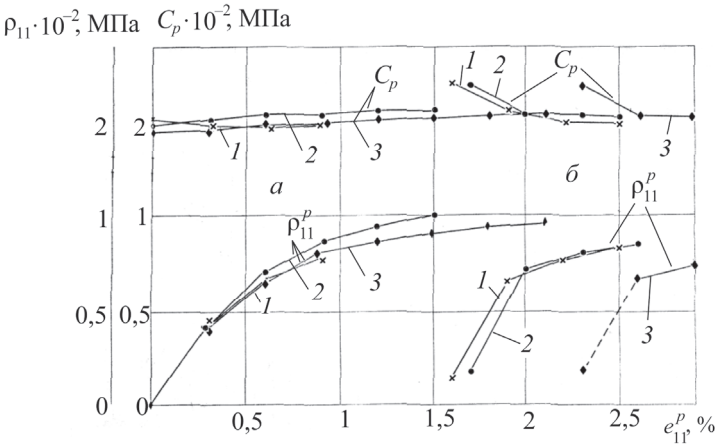


Рис. 5. Изменения радиуса поверхности текучести C_p и координаты ее центра ρ_{11}^p до и после деформации ползучести

В следующей серии испытаний (материал – сталь 12Х18Н9) взаимное влияние пластичности, ползучести и высокотемпературной выдержки исследовалось следующим образом. Образец испытывается при $T = \text{const}$ до выбранной пластической деформации по программе базового эксперимента в пластичности [12]. Определяются параметры C_p^* и ρ_{11}^{p**}. Затем образец нагревается до температуры T^*. Производятся нагружение образца до заданного напряжения σ_{11}^{**} и выдержка в течение времени t^{**} для получения соответствующего участка кривой ползучести. После выдержки образец разгружается и охлаждается до исходной температуры T_i. Далее нагружение производится вновь по

схеме базового эксперимента в пластичности, и определяются параметры пластичности C_p^{**}, ρ_{11}^{p**}.

Сравнивая эксперименты с выдержкой под нагрузкой σ_{11}^{**} и с выдержкой при нулевой нагрузке ($\sigma_{11}^{**}=0$) можно исследовать раздельное влияние эффектов ползучести и рекристаллизации на последующий ход кривой деформирования.

По данной программе испытывались 3 образца. Для всех образцов были выбраны одинаковые параметры: $T_i=20\,°\text{C}$, $\sigma_{11}^{**}=184$ МПа, $T^{**}=650\,°\text{C}$, $t^{**}=38$ мин. Деформации e_{11}^{p*} были выбраны для 3 образцов соответственно: $e_{11(1)}^{p*}=0{,}009$, $e_{11(2)}^{p*}=0{,}015$, $e_{11(3)}^{p*}=0{,}021$. Пластические деформации, предшествующие нагружению образцов до $\sigma_{11}^{**}=184$ МПа при температуре $T=650\,°\text{C}$ составили: для первого образца –0,007, для второго – 0,002, для третьего – 0,002. Суммарные пластические деформации при температурах $T=20\,°\text{C}$ и $T=650\,°C$ до начала выдержки составили: для первого образца –0,016, для второго – 0,017, для третьего – 0,023. За время $t^{**}=38$ мин величина деформации ползучести составила: для первого образца –0,0081, для второго – 0,00525, для третьего – 0,0077. Графики изменения C_p и ρ_{11}^p до и после деформации ползучести представлены на рис. 5. Анализ экспериментальных результатов позволяет сделать следующие выводы:

– предварительная пластическая деформация в практически важном диапазоне: $e_{11}^p=0{,}009\div0{,}023$ не оказывает влияния на последующую деформацию ползучести на фоне наблюдаемого разброса накопленной деформации ползучести e_{11}^c (порядка 0,3), который является обычным для материала в состоянии поставки [16];

– при оценке влияния эффекта ползучести на последующий процесс пластического деформирования материала необходимо образец выдержать при постоянной высокой температуре в течение времени, необходимого для получения заданной степени деформации ползучести, причем на последующий процесс пластического деформирования может влиять как процесс ползучести, так и процесс рекристаллизационного отжига, протекающие в материале образца во время выдержки при высокой температуре.

2.2. Численные исследования

Ниже проверяются степень адекватности и границы применимости определяющих соотношений термовязкопластичности [2, 9, 10] при постоянной нагрузке и циклическом изменении температуры, а также при различных произвольных историях изменения механической деформации и температуры. Суть проверки заключается в численном моделировании кинетики НДС рабочей части цилиндрических сплошных лабораторных образцов в условиях действия механизмов усталости и ползучести. Численные результаты сопоставляются с имеющимися экспериментальными данными при аналогичных режимах деформирования.

Участвовавшие в расчете физико-механические характеристики и параметры стали 12Х18Н9 приведены в табл. 1–4 [11, 12, 15].

Таблица 1

Значения модуля изотропного упрочнения $q_\chi(\chi_p, T)$ (МПа) стали 12Х18Н9 при монотонных лучевых путях нагружения в зависимости от длины траектории пластического деформирования χ_p и температуры T

χ_p, %	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,5	4	2
T = 20 °C	5660	5300	5200	4850	4300	3300	2700	2170	1800	1500	1150	820	430	0
T = 650 °C	2700	2700	2700	2650	2600	2450	2300	2100	1870	1700	1400	1000	500	0

Таблица 2

Зависимость модуля температурного изменения радиуса поверхности текучести $q_3^p(\chi_p, T)$, (МПа) стали 12Х18Н9 от от длины траектории пластического деформирования χ_p и температуры T

χ_p, %	0	10	30	60	90	120	1000
T = 20 °C	0,3093	0,3093	0,3093	0,3093	0,3093	0,2517	0,2517
T = 650 °C	0,123	0,104	0,0756	0,0756	0,0756	0,0756	0,0756

Таблица 3

Зависимость радиуса поверхности ползучести $C_c(\chi_c, T)$, (МПа) для стали 12Х18Н9 от длины траектории деформации ползучести χ_c и температуры T

χ_c, %	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,2	0,5	0,7	1
T = 400 °C	78	84,2	89	94,5	96,5	99	100	100,2	101	101,5	102,5
T = 650 °C	53	54	54,8	55,5	56	56,4	56,8	59,4	67	70,6	73,8

Таблица 4

Зависимость коэффициента пропорциональности $\lambda_c \cdot 10^5$, (МПа·с) стали 12Х18Н9 от параметра ψ и температуры T

$\psi = \left(\frac{\sigma_u - C_c}{C_c}\right)^k$	0	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,15	1,25	1,45	1,55	1,65	2
T = 400 °C	0	0	0,3	0,4	1	2,2	3,3	4,4	4,8	4,9	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
T = 650 °C	0	0,5	0,8	0,9	1,1	1,4	1,9	2,1	2,7	3,6	6,6	19,5	23,5	25,9	26,2

Нижеприведенные натурные и численные эксперименты посвящены исследованию процессов деформирования конструкционных материалов (металлов и их сплавов) при неизотермических законах нагружения.

Рис. 6, 7 иллюстрируют результаты численного расчета процесса ползучести лабораторного образца из стали 12Х18Н9 [12] при постоянной нагрузке (σ_{11}=200 МПа) и циклическом изменении температуры с выдержками различной длительности. Закон изменения температуры от времени приведен на рис. 6.

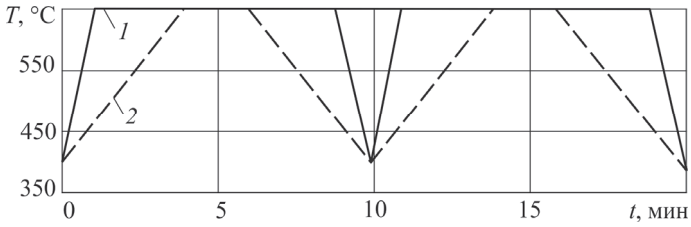


Рис. 6. История термомеханического нагружения

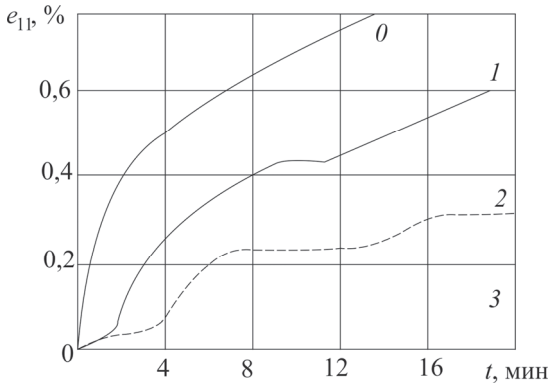


Рис. 7. Кривые ползучести стали 12Х18Н9 при постоянной нагрузке (σ_{11}=200 МПа) и циклическом изменении температуры

Было рассмотрено несколько режимов деформирования.

Первый режим: образец нагревается до температуры $T = 400$ °С и быстро нагружается до $\sigma_{11} = 200$ МПа $= \text{const}$. Затем температура в образце поднимается до $T = 650$ °С со скоростью 250 °С/мин и остается постоянной в течение $t = 8$ мин, далее снижение температуры со скоростью 250 °С/мин до 400 °С, и повторяется аналогичный цикл.

*Второй режим:*Отличается от первого скоростного разогрева и охлаждения (75,5 °С/мин) и времени выдержки при постоянной температуре ($t = 2$ мин). На рис. 7 представлены четыре кривые ползучести, полученные при одинаковом постоянном напряжении $\sigma_{11} = 200$ МПа. Кривая *0* на рис. 7 получена при температуре $T = 650$ °С, кривая *1* в результате изменения температуры в 1-м режиме, кривая *2* – во втором, кривая *3* при температуре $T_{ср} = (T_{max} + T_{min})/2 = 525$ °С.

Анализ результатов показывает, что при увеличении температуры развитая модель предсказывает появление на кривой ползучести неустановившегося участка. Более высокому типу нагрева (кривая *1*) соответствует более высокая скорость ползучести и, как следствие, большая величина накопленной деформации ползучести. Ползучесть материала при постоянной средней за цикл температуре много меньше (кривая *3*). Указанные эффекты согласуются с известными экспериментальными фактами [13, 14].

На рис. 8 сравниваются результаты численного и натурного экспериментов по растяжению лабораторного образца из стали 12Х18Н9 при различных историях изменения температуры и деформации. Сна-

чала образец деформируется при $T = 20$ °С, затем разгружается и нагревается до $T = 200$ °, снова деформируется и разгружается.

Та же история повторяется при температурах $T = 340$ °С и $T = 200$ °С.

На первом участке деформирования при $T = 20$ °С расхождение расчетных и экспериментальных значений по напряжениям достигает 10 %.

Поскольку кривая деформирования при $T = 20$ °С использовалась для определения материальных параметров и скалярных функций стали 12Х18Н9 в базовом эксперименте, несовпадение кривых деформирования в опытном и численном эксперименте по уровню напряжений объясняется разбросом физико-механических характеристик материала.

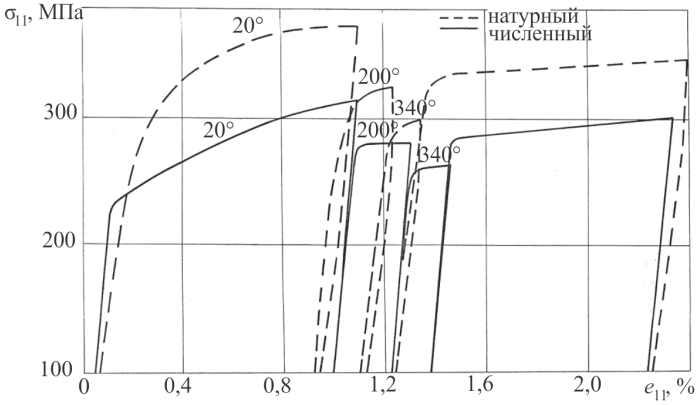


Рис. 8. Численные (сплошная) и экспериментальные (пунктирная) результаты растяжения лабораторного образца из стали 12Х18Н9 при различных историях изменения температуры и механической деформации

Результаты сравнения численных и натурных экспериментов, представленные на рис. 8, посвящены исследованию процессов деформирования, в которых одновременно имеются два заданных параметра: $e_{11}(t)$ и $T(t)$ («жесткое нагружение»).

В эксперименте (рис. 9) реализовывался произвольный закон $e_{11}(t)$ и $T(t)$, эти же закономерности задавались и в численном эксперименте. Сравнение расчетных (пунктирных линий) напряжений с экспериментальными (сплошные линии) показало качественное и количественное совпадение результатов.

Для иллюстрации достоверности модели термовязкопластичности и разработанного алгоритма интегрирования определяющих соотношений был реализован численный эксперимент по «жесткому» деформированию лабораторного образца из стали 12Х18Н9 по следующим законам изменения скорости деформации на первом участке $\dot{e}_{11} = \frac{1}{6} \cdot 10^{-3} c^{-1}$ при t = 0,5 мин, затем $\dot{e}_{11} = \frac{1}{3} 10^{-5} \text{с}^{-1}$ при t = 0,5 мин.

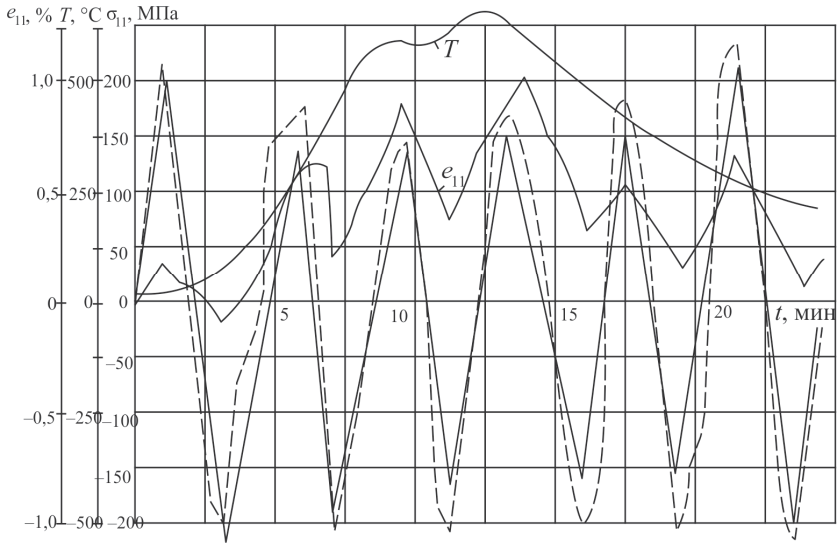


Рис. 9. Численные (сплошная) и экспериментальные (пунктирная) результаты растяжения лабораторного образца из стали 12Х18Н9 при произвольных законах изменения температуры и механической деформации

Результаты численного эксперимента представлены на рис. 10–13. На первом участке нагружения (до точки *A* на рис. 10–13 происходит процесс вязкоупругопластического деформирования материала). Скорость деформирования такова, что деформации пластичности и ползучести соизмеримы. После резкого изменения скорости в точке *A* на участке *AB* (см. рис. 10) скорость деформации ползучести больше заданной скорости полной деформации, вследствие чего на этом участке наблюдается релаксация напряжений (см. рис. 11, 12) – на кривой $\sigma_{11} \sim e_{11}$ появляется зуб текучести *AE*. Поведение материала на этом участке вязкоупругое. В результате упрочнения скорость ползучести падает и после точки *E* (см. рис. 10–13) становится меньше полной заданной скорости деформирования $\dot{e}_{11}$. В результате напряжение на

участке *EB* начинает расти (см. рис. 11–13) и в точке *B* достигает предела текучести. На участке *AB* пластическое состояние материала не изменяется. После точки *B* поведение материала вязкоупругопластическое. Величина напряжения контролируется условием текучести и величиной деформации ползучести.

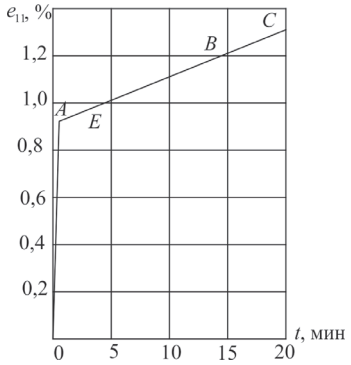


Рис. 10. Зависимость изменения деформации от времени

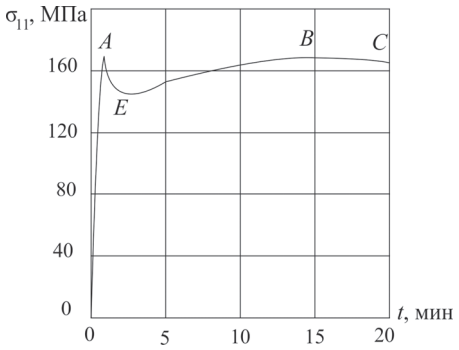


Рис. 11. Зависимость изменения напряжения от времени

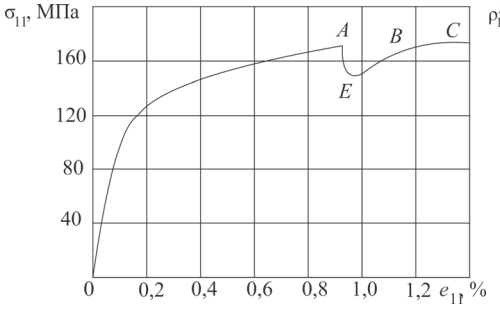


Рис. 12. Кривая деформирования

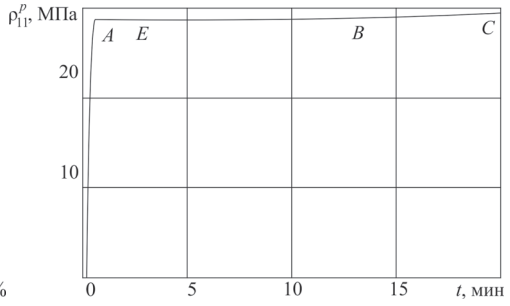


Рис. 13. Изменение координат поверхности текучести от времени

На рис. 14 показаны экспериментальные [12] (штриховая линия) и расчетные (сплошная линия) диаграммы деформирования стали 12Х18Н9 при «жестком» нагружении при температуре $T = 650$ °С по следующему закону изменения деформации во времени:

– первый участок *OA* (см. рис. 14) – нагружение за 30 мин до $e_{11} = 0{,}6\%$;

– второй участок *AD* – разгрузка до деформации, соответствующей $\sigma_{11} = 0$;

– третий участок *DB* – нагрузка до $e_{11} = 1{,}3\%$ за время $t = 1$ мин;

– четвертый участок *BF* – разгрузка до e_{11}, соответствующей $\sigma_{11} = 0$;

– пятый участок *FC* – последующая нагрузка до e_{11} = 1,7 % за время t = 20 мин.

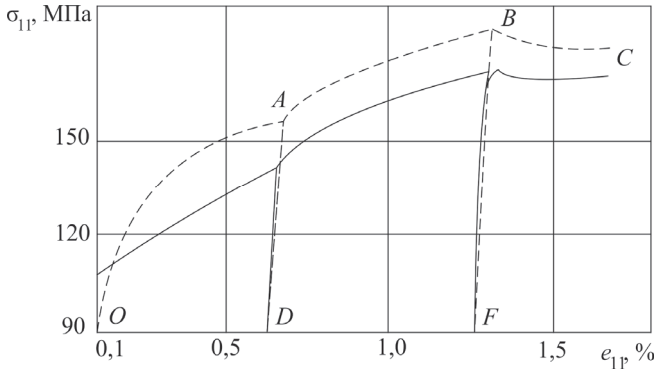


Рис. 14. Экспериментальные (штриховая линия) и расчетные (сплошная линия) диаграммы деформирования стали 12Х18Н9 при температуре T = 650 °С

Таким образом, на каждом участке деформирования в натурном эксперименте поддерживалась различная средняя скорость деформирования, составляющая на участке *OA* и *BC* – $\dot{e}_{11} \approx 0{,}3 \cdot 10^{-5}$ с$^{-1}$ и на участке *AB* – $\dot{e}_{11} \approx 0{,}1 \cdot 10^{-3}$ с$^{-1}$. Данный эксперимент отражает влияние истории изменения скорости деформации на поведение кривой деформирования $\sigma_{11} \sim e_{11}$.

В численном эксперименте в пределах каждого участка деформирования задавались $\dot{e}_{11}$, соответствующие средним экспериментальным скоростям деформирования на данных участках.

Сопоставление численных и экспериментальных результатов показывают, что развитая модель с достаточной для инженерных расчетов точностью отражает влияние изменения скорости деформирования на поведение диаграммы $\sigma_{11} \sim e_{11}$.

В следующем примере (рис. 15) приведены результаты численного эксперимента по «жесткому» нагружению образца 12Х18Н9 при T = 650 °С. Рассмотрены варианты с различной историей изменения скорости деформирования $\dot{e}_{11}$. Сплошная линия соответствует $\dot{e}_{max} = 2{,}56 \cdot 10^{-2}$ с$^{-1}$, штриховая – $\dot{e}_{min} = 1{,}3 \cdot 10^{-4}$ с$^{-1}$.

Рассмотрено несколько вариантов расчета.

Первый вариант – нагрузка с $\dot{e}_{\max}$ до точки *A* (см. рис. 15), разгрузка до $\sigma_{11}=0$ и последующее нагружение (штриховая кривая *1*) со скоростью $\dot{e}_{\min}$.

Второй вариант – резкий переход в точке *A* (рис. 15) с $\dot{e}_{\max}$ на $\dot{e}_{\min}$ (кривая *2*).

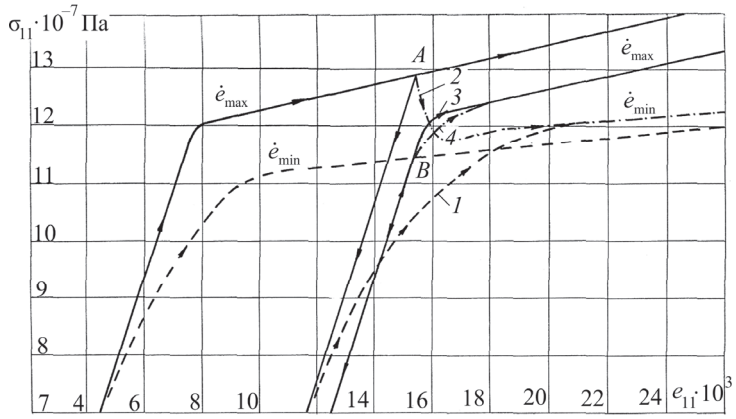


Рис. 15. Зависимость диаграммы деформирования стали 12Х18Н9 от истории изменения скорости деформирования

Третий вариант – нагружение со скоростью $\dot{e}_{\min}$ до точки *B* (см. рис. 15), разгрузка до $\sigma_{11}=0$ и последующее нагружение со скоростью $\dot{e}_{\max}$ (кривая *3*).

Четвертый случай – резкий переход с $\dot{e}_{\min}$ к $\dot{e}_{\max}$ в точке *B* (кривая *4*).

Заключение

Развита математическая модель термовязкопластичности, описывающая процессы неупругого деформирования в конструкционных сталях при взаимном влиянии эффектов пластичности и ползучести.

Проведены экспериментальные исследования взаимного влияния процессов ползучести и пластичности и эффектов высокотемпературных выдержек на примере конструкционной стали 12Х18Н9.

Методом численного моделирования на ЭВМ и сравнения полученных результатов с опытными данными проведена оценка адекват-

ности определяющих соотношений термовязкопластичности, которая позволяет сделать вывод о достоверности определяющих соотношений термовязкопластичности и точности разработанной методики определения материальных параметров, входящих в указанные соотношения.

Проведены численные исследования процесса ползучести лабораторных образцов, выполненных из стали 12Х18Н9 при постоянной нагрузке и циклическом изменении температуры с выдержками различной длительности, и выполнено сравнение полученных численных результатов с данными натурных экспериментов.

Выполнено сравнение результатов численного и натурного экспериментов по растяжению лабораторных образцов из стали 12Х18Н9 при различных историях изменения температуры и механической деформации.

Показано, что развитая модель термовязкопластичности с достаточной для инженерных расчетов точностью отражает влияние изменения скорости деформирования на поведение диаграммы $\sigma_{11} \sim e_{11}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00204-а).

Библиографический список

1. Митенков Ф.М., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2007. – 448 с.

2. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. – 424 с.

3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

4. Гомюк, Бью Куок Т. Расчет долговечности коррозионностойкой стали 304 в условиях взаимодействия усталости и ползучести с использованием теории непрерывного повреждения // Труды Амер. о-ва инж.-мех. Сер. Д. Теорет. основы инж. расчетов. – 1986. – Т. 108, № 3. – С. 111–136.

5. Гомюк, Бью Куок Т., Бирон А. Изучение поведения стали 316 при нагружениях по схемам усталости, ползучести и совместного действия усталости и ползучести // Современное машиноведение. – 1991. – № 1. – С. 14–23.

6. Казанцев А.Г. Исследование взаимодействия малоцикловой усталости и ползучести при неизотермическом нагружении // Проблемы прочности. – 1985. – № 5. – С. 25–31.

7. Ле Мэй. Развитие параметрических методов обработки результатов испытаний на ползучесть и длительную прочность // Труды Амер. о-ва инж.-мех. Сер. Д. Теорет. основы инж. расчетов. – 1979. – Т. 101, № 4. –С. 19–24.

8. Мэнсон, Энсайн. Успехи за последнюю четверть века в развитии методов корреляции и экстраполяции результатов испытаний на длительную прочность // Труды Амер. о-ва инж.-мех. Сер. Д. Теорет. основы инж. расчетов. – 1979. – Т. 101, № 4. – С. 9–18.

9. Numerical modeling of elastoplastic deformation and damage accumulation in metals under low-cycle fatigue conditions / I.A. Volkov, Yu.G. Korotkikh, I.S. Tarasov and D.N. Shishulin // J. Strength of Materials. – 2011. – Vol. 43. – No. 4. – P. 471–485.

10. Модель поврежденной среды для оценки ресурсных характеристик конструкционных сталей при механизмах исчерпания, сочетающих усталость и ползучесть материала / И.А. Волков, А.И. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2013. – Т. 6, № 2. – С. 232–245.

11. Волков И.А., Казаков Д.А., Коротких Ю.Г., Экспериментально-теоретические методики определения параметров уравнений механики поврежденной среды при усталости и ползучести // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2012. − № 2. − С. 50−78.

12. Казаков Д.А. Экспериментально-теоретическое исследование вязкопластического деформирования сталей в области повышенных температур и скоростей деформаций до 10^{-2} $с^{-1}$ // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация решения задач упругости и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. Горьковского ун-та. – Горький, 1985. – С. 89–97.

13. Ползучесть цинка при теплосменах / В.А. Лихачев, Г.А. Малыгин [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1963. – Т. 16. – Вып. 6.

14. Теория ползучести и длительной прочности металлов / И.А. Одинг, В.С. Иванова, В.В. Бурдукский, В.Н. Геминов. – М.: Металлургия, 1959. – 488 с.

15. Можаровская Т.Н. Программа и методика исследования ползучести и длительной прочности материалов с учетом вида девиатора напряжений и истории нагружения // Проблемы прочности. – 1984. – № 11. – С. 83–88.

16. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

17. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity // Inter. J. of Plasticity. – 1989. – Vol. 5. – No. 3. – P. 247–302.

18. Benallal A., Marquis D. Constitutive Equations for Nonproportional Cyclic Elasto-Viscoplasticity // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1987. – Vol. 109. – P. 326–337.

19. Lemaitre J. Damage modelling for prediction of plastic or creep fatigue failure in structures // Trans. 5th Int. Conf. SMRiT, North Holland, 1979. No. L5/1b.

20. Murakami S., Imaizumi T. Mechanical description of creep damage and its experimental verification // J. Mec. Theor. Appl. – 1982. – No. 1. – P. 743–761.

References

1. Mitenkov F.M., Kaidalov V.B., Korotkikh Yu.G. Metody obosnovaniya resursa yadernykh ehnergeticheskikh ustanovok [Methods of study resource nuclear power plants]. Moscow: Mashinostroenie, 2007. 448 p.

2. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. Uravneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami [Equations of state viscoelastoplastic media with injuries]. Moscow: Fizmatlit, 2008. 424 p.

3. Collins J. Povrezhdenie materialov v konstruktsiyakh. Analiz, predskazanie, predotvrashhenie [Damage to materials in the construction . Analysis, prediction, prevention]. New York: Wiley, 1984. 624 p.

4. Gomyuk, Beau-Quoc T. Raschet dolgovechnosti korrozionnostojkoj stali 304 v usloviyakh vzaimodejstviya ustalosti i polzuchesti s ispolzovaniem teorii nepreryvnogo povrezhdeniya [Calculation durability stainless steel 304 in interaction of fatigue and creep by using the theory of continuous damage]. *Proceedings of the Amer. Islands of engineer – fur. Ser. D. Teor. Ing basis. calculations*, 1986, vol. 108, no. 3, pp. 111-136.

5. Gomyuk, Beau-Quoc T., Biron A. Izuchenie povedeniya stali 316 pri nagruzheniyakh po skhemam ustalosti, polzuchesti i sovmestnogo dejstviya ustalosti i polzuchesti [The behavior of 316 during loading

schemes fatigue , creep and fatigue and joint action of creep]. *Modern machines*, 1991, no. 1, pp. 14-23.

6. Kazantsev A.G. Issledovanie vzaimodejstviya malotsiklovoj ustalosti i polzuchesti pri neizotermicheskom nagruzhenii [Investigation of the interaction of low-cycle fatigue and creep under nonisothermal loading]. *Problems of strength*, 1985, no. 5, pp. 25-31.

7. LeMay. Razvitie parametricheskikh metodov obrabotki rezultatov ispytanij na polzuchest i dlitelnuyu prochnost [Development of parametric methods of processing the results of creep tests and long-term strength]. *Proceedings of Amer. Islands of engineer fur. Ser. D. Teor. Ing basis. calculations*, 1979, vol. 101, no. 4, pp. 19-24.

8. Manson Ensign. Uspekhi za poslednyuyu chetvert veka v razvitii metodov korrelyatsii i ehkstrapolyatsii rezultatov ispytanij na dlitelnuyu prochnost [Successes over the past quarter century in the development of methods of correlation and extrapolation of the test results on the long-term strength]. *Proceedings of the Amer. Islands of engineer fur. Ser. D. Teor. Ing basis. calculations*, 1979, vol. 101, no. 4, pp. 9-18.

9. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S., Shishulin D.N. Numerical modeling of elastoplastic deformation and damage accumulation in metals under low-cycle fatigue conditions. *J. Strength of Materials*, 2011, vol. 43, no. 4, pp. 471-485.

10. Volkov I.A., Volkov A.I., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S Model povrezhdyonnoj sredy dlya otsenki resursnykh kharakteristik konstruktsionnykh stalej pri mekhanizmakh ischerpaniya, sochetayushhikh ustalost i polzuchest materiala [Damaged environment model for the evaluation of resource characteristics of structural steels in the mechanisms of exhaustion , fatigue and creep combining material]. *Calc. fur. the solid. Matter*., 2013, vol. 6, no. 2, pp. 232-245.

11. Volkov I.A., Kazakov D.A., Korotkikh Yu.G. EHksperimentalno-teoreticheskie metodiki opredeleniya parametrov uravnenij mekhaniki povrezhdyonnoj sredy pri ustalosti i polzuchesti [Experimental and theoretical methods for determining the parameters of the equations of mechanics damaged environment with fatigue and creep]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2012, no. 2, pp. 50-78.

12. Kasakov D.A. EHksperimentalno teoreticheskoe issledovanie vyazkoplasticheskogo deformirovaniya stalej v oblasti povyshennykh tem-

peratur i skorostej deformatsij do 10^{-2} s^{-1} [Experimental and theoretical investigations of visco-plastic deformation structural steels in high temperature and strain rate to 10^{-2} s^{-1}]. *Applied problems of strength and ductility. Algorithmic and automation solutions of problems of elasticity and plasticity*. Proc. Intercollege. Sat Gorky University, 1985, pp. 89-97.

13. Likhachev V.A., Maligin G.A. Polzuchest tsinka pri teplosmenakh [Creep and other zinc thermal cycles]. *Fiz.*, 1963, vol. 16, iss. 6.

14. Oding I.A., Ivanova V.S., Burduksky V.V., Geminov V.N. Teoriya polzuchesti i dlitelnoj prochnosti metallov [Theory of creep and creep rupture of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1959. 488 p.

15. Mozharovskaya T.N. Programma i metodika issledovaniya polzuchesti i dlitelnoj prochnosti materialov s uchyotom vida deviatora napryazhenij i istorii nagruzheniya [Program and method of study of creep and creep rupture of materials with regard to the form of the stress deviator and loading history]. *Problems of Strength*, 1984, no. 11, pp. 83-88.

16. Rabotnov Yu.N. Polzuchest' ehlementov konstruktsij [Creep of structural elements]. Moscow: Nauka, 1966, 752 p.

17. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Inter. J. of Plasticity*, 1989, vol. 5, no. 3, pp. 247-302.

18. Benallal A., Marquis D. Constitutive Equations for Nonproportional Cyclic Elasto-Viscoplasticity. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1987, vol. 109, pp. 326-337.

19. Lemaitre J. Damage modelling for prediction of plastic or creep fatigue failure in structures. *Trans. 5th Int. Conf. SMRiT, North Holland*, 1979, no. L5/1b.

20. Murakami S., Imaizumi T. Mechanical description of creep damage and its experimental verification. *J. Mec. Theor. Appl.*, no 1, 1982, pp. 743-761.

Сведения об авторах

Волков Иван Андреевич (Нижний Новгород, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и подъемно-транспортных машин Волжской государственной академии водного транспорта (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru).

Волков Андрей Иванович (Нижний Новгород, Россия) – магистрант кафедры прикладной математики и подъемно-транспортных

машин Волжской государственной академии водного транспорта (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru).

Казаков Дмитрий Александрович (Нижний Новгород, Россия) – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией НИИ Механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (603022, Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 6, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru).

Коротких Юрий Георгиевич (Нижний Новгород, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры Волжской государственной академии водного транспорта (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru).

Тарасов Иван Сергеевич (Нижний Новгород, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией кафедры прикладной математики и подъемно-транспортных машин Волжской государственной академии водного транспорта (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru).

About the authors

Ivan A. Volkov (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied mathematics and lifting transport machines, Volga State Academy of Water Transport (5a, Nesterova str., 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru).

Andrey I. Volkov (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Master Degree Student of the Department of Applied mathematics and lifting transport machines, Volga State Academy of Water Transport (5a, Nesterova str., 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru).

Dmitry A. Kazakov (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Head of the Laboratory at Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23, Gagarin av., Building 6, 603022, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru).

Yuri G. Korotkikh (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Honored Russian Scien-

tist, Department of Applied mathematics and lifting transport machines, Volga State Academy of Water Transport (5a, Nesterova str., 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru).

Ivan S. Tarasov (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Associate Professor, Head of Laboratory of the Department of Applied mathematics and lifting transport machines, Volga State Academy of Water Transport (5a, Nesterova str., 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru).

Получено 06.02.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Волков И.А., Волков А.И., Казаков Д.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С. Экспериментально-теоретические исследования процессов вязкопластического деформирования конструкционных сталей с учетом взаимного влияния эффектов пластичности и ползучести // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 1. – С. 76–107.

Please cite this article in English as:

Volkov I.A., Volkov A.I., Kazakov D.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S. Experimental and theoretical investigations of visco-plastic deformation in structural steels considering mutual influence of plasticity and creep effects. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2013. No. 1. P. 76-107.