

УДК 539.3

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛЗУЧЕСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА КРАТКОВРЕМЕННУЮ ПОЛЗУЧЕСТЬ
ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ***

© 2017 г. **Волков И.А.^{1,2}, Игумнов Л.А.², Шишулин Д.Н.³,
Тарасов И.С.¹, Сметанин И.В.¹**

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

²*Научно-исследовательский институт механики*

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

³*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

pmptmvgavt@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.12.2016

Обсуждается проблема экспериментально-теоретического исследования взаимосвязанных процессов пластичности и ползучести конструкционных материалов (металлов и их сплавов) в различных условиях нагружения, напряженного состояния, нагрева.

Кратко изложена математическая модель, описывающая взаимосвязанные процессы термопластичности и нестационарной ползучести металлов при сложном нагружении, и алгоритм ее интегрирования.

Приводятся результаты численного моделирования кратковременной ползучести стали 30ХГСА при сложном нагружении по двухзвенным ломаным траекториям непропорционального деформирования. Полученные численные результаты сравниваются с данными натурных экспериментов. Особое внимание уделяется исследованию изменения характеристик пластичности и ползучести в зависимости от скорости деформаций.

Проведена оценка достоверности исследуемых определяющих соотношений термовязкопластичности путем сопоставления результатов численных расчетов с опытными данными по кратковременной ползучести стали 30ХГСА при сложном нагружении. Показана существенная зависимость изменения характеристик пластичности и ползучести от скорости деформации.

Ключевые слова: пластичность, нестационарная ползучесть, определяющие соотношения, моделирование, скорость деформаций, температура, численный и натуральный эксперимент, сложное нагружение, двухзвенная траектория, теория пластического течения.

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-19-10237).

Введение

Тенденция развития конструкций и аппаратов новой техники характеризуется увеличением их рабочих параметров, снижением материалоемкости за счет применения новых конструкционных материалов и использования рациональных конструктивных схем, существенным расширением температурного диапазона работы машиностроительных конструкций [1].

При повышенных температурах обнаруживается существенная зависимость физико-механических характеристик конструкционных материалов от скорости деформирования, а в ряде случаев и от продолжительности нагрева.

Экспериментальное изучение кратковременной ползучести проводят, главным образом, на основе четырех типов испытаний [2–6]:

- опытов при постоянном напряжении (собственно ползучесть материала);
- опытов с заданными скоростями деформирования;
- опытов с заданными скоростями роста напряжений;
- опытов на релаксацию напряжений.

Значительно реже проводят эксперименты по специальным программам нагрева и нагружения, связанным с особыми условиями эксплуатации конструкций.

Для развития фундаментальных основ математической теории ползучести и установления критериев разрушения конструкционных материалов необходима постановка и проведение таких опытов, в которых создается однородное сложное напряженное состояние образца. Наиболее распространенными являются опыты с тонкостенными трубчатыми образцами, когда они одновременно подвергаются действию равномерно приложенных по концам растягивающих сил P , крутящих моментов M и равномерного внутреннего давления q по различным программам нагружения.

Компоненты тензоров напряжений σ_{ij} и деформаций e_{ij} вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \frac{P}{F} = \frac{P}{2\pi R h}, & \sigma_{22} &= \frac{qR}{h}, & \sigma_{12} &= \frac{M}{2\pi R^2 h}, \\ \sigma_{33} = \sigma_{13} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = \sigma_{32} &= 0, & \sigma &= \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22}), \\ e_{11} &= \frac{\Delta l}{l}, & e_{22} &= \frac{\Delta R}{R}, & e_{12} &= \frac{\varphi R}{2l}, \\ e_{33} &= -(e_{11} + e_{22}) + \frac{\sigma}{K}, & e_{13} = e_{31} = e_{23} = e_{32} &= 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где $F = 2\pi R h$ – площадь сечения трубчатого образца, h – толщина стенки, R – радиус срединной поверхности оболочки (трубчатого образца), l – длина рабочей части образца, φ – угол закручивания, σ – шаровая компонента тензора напряжений, K – упругий модуль деформации Бриджмена.

Проведение таких опытов на широком классе сложных траекторий деформирования, сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическими результатами позволяют провести проверку физической достоверности развитых определяющих соотношений теории вязкопластичности.

Результаты таких исследований могут быть также полезны при определении (конкретизации) материальных параметров, скалярных функций и функционалов, входящих в определяющие соотношения термовязкопластичности [7–10].

В работах [1, 9, 10] развита математическая модель термовязкопластичности, описывающая процессы неупругого деформирования конструкционных материалов (металлов и их сплавов) при произвольных сложных путях комбинированного термомеханического нагружения.

Ниже дается оценка достоверности развитых определяющих соотношений нестационарной ползучести с учетом наличия образовавшихся пластических деформаций путем сопоставления полученных теоретических решений с имеющимися в литературе экспериментальными данными [6] по исследованию кратковременной ползучести стали 30ХГСА при простом и сложном нагружении. Проведено исследование закономерностей изменения скалярных и векторных свойств стали 30ХГСА на плоских двухзвенных ломаных траекториях непропорционального деформирования с учетом зависимости от скорости деформаций.

1. Определяющие соотношения термовязкопластичности

Определяющие соотношения термовязкопластичности базируются на следующих основных положениях:

- компоненты тензора деформаций e_{ij} , заданного в ортогональной декартовой системе координат с локальными векторами базиса \bar{e}_i , и соответствующие им компоненты тензора скоростей деформаций \dot{e}_{ij} представляют собой сумму «мгновенной» и «временной» составляющих. «Мгновенная» составляющая тензора деформаций включает в себя упругие компоненты e_{ij}^e, \dot{e}_{ij}^e (не зависящие от истории нагружения и определяющиеся конечным состоянием процесса) и пластические e_{ij}^p, \dot{e}_{ij}^p (зависящие от истории процесса нагружения). 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 . Скорость деформаций ползучести \dot{e}_{ij} («временная» составляющая) описывает временную зависимость процесса деформирования при низких скоростях нагружения;

- 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 с радиусом C_c и координатами центра ρ_{ij}^c , вектор скорости деформации ползучести к которой направлен по нормали;

- рассматриваются начально изотропные среды;

- рассматриваются малые деформации;

- 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:

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

$$\dot{\sigma} = 3K[\dot{e} - \dot{\alpha}T - \alpha\dot{T}] + \frac{\dot{K}\sigma}{K}, \quad \dot{\sigma}'_{ij} = 2G\dot{e}'_{ij} + \frac{\dot{G}\sigma'_{ij}}{G}.$$

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 $\dot{\sigma}_{ij}, \dot{e}_{ij}$; T – 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:

$$F_s = S_{ij}S_{ij} - C_p^2 = 0, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}^p. \quad (3)$$

Для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве напряжений вводится поверхность циклической «памяти». Уравнение поверхности «памяти»:

$$F_p = \rho_{ij}^p \rho_{ij}^p - \rho_{\max}^2 = 0, \quad (4)$$

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

Принимается эволюционное уравнение для радиуса поверхности текучести вида [8, 9]:

$$\dot{C}_p [q_\chi H(F_p) + a(Q_s - C_p) \Gamma(F_p)] \dot{\chi} + q_3 \dot{T}, \quad (5)$$

$$C_p = C_p^0 + \int_0^t \dot{C}_p dt, \quad \dot{\chi} = \left(\frac{2}{3} \dot{e}'_{ij} \dot{e}'_{ij} \right)^{1/2}, \quad \chi_m = \int_0^t \dot{\chi} H(F_p) dt, \quad \chi = \int_0^t \dot{\chi} dt, \quad (6)$$

$$q_\chi = \frac{q_2 A \psi_1 + (1-A) q_1}{A \psi_1 + (1-A)}, \quad Q_s = \frac{Q_2 A \psi_2 + (1-A) Q_1}{A \psi_2 + (1-A)}, \quad 0 \leq \psi_i \leq 1 \quad (i = 1, 2), \quad (7)$$

$$A = 1 - \cos^2 \theta, \quad \cos \theta = n_{ij}^e n_{ij}^s, \quad n_{ij}^e = \frac{\dot{e}'_{ij}}{(\dot{e}'_{ij} \dot{e}'_{ij})^{1/2}}, \quad n_{ij}^s = \frac{S_{ij}}{(S_{ij} S_{ij})^{1/2}}, \quad (8)$$

$$H(F_p) = \begin{cases} 1, & F_p = 0 \wedge \rho_{ij}^p \dot{\rho}_{ij}^p > 0 \\ 0, & F_p < 0 \vee \rho_{ij}^p \dot{\rho}_{ij}^p \leq 0 \end{cases}, \quad \Gamma(F_p) = 1 - H(F_p). \quad (9)$$

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 ρ_{\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.

Внутренняя переменная ρ_{ij}^p , учитывающая анизотропию упрочнения пластического деформирования, удовлетворяет эволюционному уравнению [7, 8]:

$$\dot{\rho}_{ij}^p = g_1^p \dot{e}'_{ij} - g_2^p \rho_{ij}^p \dot{\chi} - g_3^p \rho_{ij}^p \langle \dot{T} \rangle, \quad \rho_{ij}^p = \int_0^t \dot{\rho}_{ij}^p dt, \quad (10)$$

где $g_1^p > 0, g_2^p > 0$ и $g_3^p > 0$ – модули анизотропного упрочнения.

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

$$\dot{\rho}_{\max} = \frac{(\rho_{ij}^p \dot{\rho}_{ij}^p) H(F_p)}{(\rho_{mn}^p \rho_{mn}^p)^{1/2}} - g_2 \rho_{\max} \dot{\chi} - g_3 \rho_{\max} \langle \dot{T} \rangle. \quad (11)$$

Здесь и далее для любой величины \dot{B} , заключенной в угловые скобки $\langle \rangle$, выполняются условия

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

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

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

где λ_p – коэффициент пропорциональности, определяемый из условия прохождения новой поверхности текучести через конец вектора девиатора напряжений в конце этапа нагружения [8, 9].

Если величина напряжений, температура и скорость нагружения таковы, что эффекты ползучести существенны, параметры процесса деформирования материала должны определяться с учетом процесса ползучести на этапе нагружения. Влияние этих эффектов берется в расчет при определении χ_p с учетом средней скорости деформации ползучести \dot{e}_{ij}^c на этапе нагружения Δt .

Для описания процессов ползучести вводим в пространстве напряжений семейство эквипотенциальных поверхностей ползучести F_c , имеющих общий центр ρ_{ij}^c и различные радиусы C_c , определяемые текущим напряженным состоянием [9]:

$$F_c^{(i)} = S_{ij}^c S_{ij}^c - C_c^2 = 0, \quad S_{ij}^c = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}^c \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

Согласно ассоциированному закону

$$\dot{e}_{ij}^c = \lambda_c \frac{\partial F_c^{(i)}}{\partial S_{ij}^c} = \lambda_c S_{ij}^c, \quad (14)$$

где λ_c соответствует текущей поверхности $F_c^{(i)}$, определяющей текущее напряженное состояние S_{ij}^c .

Среди этих эквипотенциальных поверхностей можно выделить поверхность с радиусом \bar{C}_c , соответствующую нулевой скорости ползучести:

$$F_c^{(0)} = \bar{S}_{ij}^c \bar{S}_{ij}^c - \bar{C}_c^2 = 0, \quad \bar{S}_{ij}^c = \bar{\sigma}'_{ij} - \rho_{ij}^c, \quad (15)$$

где \bar{S}_{ij}^c и $\bar{\sigma}'_{ij}$ – совокупность напряженных состояний, отвечающих (с определенным допуском) нулевой скорости ползучести.

Принимаем, что

$$\begin{aligned} \bar{C}_c &= \bar{C}_c(\chi_c, T), \quad \dot{\chi}_c = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^c, \dot{e}_{ij}^c \right)^{1/2}, \quad \chi_c = \int_0^t \dot{\chi}_c dt, \\ \lambda_c &= \lambda_c(\psi_c, T), \quad \psi_c = \frac{(S_{ij}^c S_{ij}^c)^{1/2} - \bar{C}_c}{C_c}, \end{aligned} \quad (16)$$

где \bar{C}_c и λ_c – экспериментально определяемые функции температуры T ; λ_c принимается равной нулю при $\psi_c \leq 0$.

Эволюционное уравнение для изменения координат центра поверхности ползучести имеет вид [9]:

$$\dot{\rho}_{ij}^c = g_1^c \dot{e}_{ij}^c - g_2^c \rho_{ij}^c \dot{\chi}_c, \quad (17)$$

где g_1^c и $g_2^c > 0$ – экспериментально определяемые материальные параметры.

Конкретизируя соотношение (14), закон градиентальности можно представить в виде

$$\dot{e}_{ij}^c = \lambda_c (\psi_c, T) S_{ij}^c = \lambda_c \psi_c S_{ij}^c = \lambda_c \cdot \frac{\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c}{C_c} S_{ij}^c, \quad (18)$$

откуда выражение для длины траектории деформаций ползучести примет вид:

$$\dot{\chi}_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{e}_{ij}^c = \sqrt{\frac{2}{3}} \lambda_c \left(\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c \right). \quad (19)$$

Из (19) для трех участков кривой ползучести [7–9] выражение для λ_c примет вид [9]:

$$\lambda_c = \begin{cases} 0, & \psi_c \leq C_c \vee \chi_c = 0, \\ \lambda_c^I, & 0 \leq \chi_c \leq \chi_c^{(1)}, \\ \lambda_c^{II}, & \chi_c^{(1)} \leq \chi_c \leq \chi_c^{(2)}, \\ \lambda_c^{III}, & \chi_c^{(2)} \leq \chi_c \leq \chi_c^{(3)}, \end{cases} \quad (20)$$

где

$$\lambda_c^I = \lambda_c^{(0)} \cdot \left(1 - \frac{e_{11}^c}{e_{11}^{c(1)}} \right) + \lambda_c^{(1)} \frac{e_{11}^c}{e_{11}^{c(1)}}, \quad \lambda_c^{II} = \frac{3}{2} \frac{\dot{e}_{11}^{c(\text{уст})}}{\sigma'_{11} - (3/2)\rho_{11}^c - \bar{\sigma}_c}, \quad \lambda_c^{III} = \frac{\lambda_c^{II}}{(1-\omega)^{r_c}}$$

получают из экспериментов при одноосном напряженном состоянии лабораторного образца [10].

В формулах (20) $\lambda_c^{(0)}$ и $\lambda_c^{(1)}$ – значения λ_c в начальной и конечной точках первого участка кривой ползучести материала [10]; $\chi_c^{(1)}$, $\chi_c^{(2)}$ и $\chi_c^{(3)}$ – границы участков кривой ползучести при многоосном деформировании по лучевым траекториям; $e_{11}^{c(1)}$ – граница первого участка кривой ползучести при одноосном напряженном состоянии; $\dot{e}_{11}^{c(\text{уст})}$ – скорость деформации ползучести на участке установившейся ползучести (2-й участок кривой ползучести); ω – величина поврежденности материала; $\bar{\sigma}_c = \sqrt{2/3} \bar{C}_c$ – предел ползучести при одноосном напряженном состоянии; r_c – параметр материала [1, 8–10].

Уравнения (13)–(20) описывают неустановившиеся и установившиеся участки кривой ползучести при разных уровнях напряжений и основные эффекты процесса ползучести при знакопеременном напряжении. Связь уравнений ползучести (13)–(20) с уравнениями (2)–(12), описывающими «мгновенные» пластические деформации, осуществляется на этапе нагружения через девиатор напряжений σ'_{ij} и соответствующий алгоритм определения \dot{e}_{ij}^c и \dot{e}_{ij}^p на этапе нагружения путем определенных соотношений между «временными» и «мгновенными» скалярными и тензорными величинами.

При разработке моделей деформирования материалов для широкого спектра термомеханических нагрузок с широкой областью применимости неизбежно приходится искать компромисс между соответствием модели действительному поведению материала в эксплуатационных условиях, возможностью и эффективностью применения модели при решении прикладных задач на компьютере, возможностью

экспериментального определения материальных параметров модели и точностью определения этих параметров. Невозможность точного определения входящих в модель материальных параметров может привести к нулевой практической ценности модели [1]. Поэтому вариант определяющих соотношений нестационарной термовязкопластичности при сложном напряженном состоянии (2)–(20) был сформулирован как система «вложенных» моделей. В условиях отсутствия необходимой экспериментальной информации или ввиду несущественного влияния тех или иных физических эффектов при занулении соответствующих материальных параметров из общего случая модели получаются частные соотношения термовязкопластичности при сложном нагружении.

Определение основных характеристик процесса вязкопластического деформирования поврежденных материалов (параметров состояния), которые в общем случае описываются тензорами $\sigma_{ij}, e_{ij}, e_{ij}^p, \rho_{ij}^p, e_{ij}^c, \rho_{ij}^c$ и скалярами $\chi_p, \chi_c, C_p, C_c, T$, осуществляется написанием определяющих соотношений термовязкопластичности 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.

В общем случае напряжения, пластические деформации и деформации ползучести определяются интегрированием уравнений термоползучести (13)–(20) четырехточечным методом Рунге – Кутты с коррекцией девиатора напряжений и последующим определением напряжений согласно уравнениям термопластичности (2)–(12) с учетом средней скорости деформации ползучести в момент времени $t_{n+1} = t_n + \Delta t$.

2. Численные результаты

Для установления связи между тензорами напряжений и деформаций в вязкопластической области при действии высоких температур и меняющихся во времени силовых нагрузок, а также для построения достоверной теории нестационарной ползучести при многоосных напряженных состояниях наряду с опытами при постоянных напряжениях необходимы эксперименты по заданной программе нагружения или деформирования лабораторных образцов. Опыты проводят путем одноосного растяжения лабораторных образцов при заданных скоростях деформирования и условии, что в каждом опыте скорость деформации и температура остаются неизменными [2–5, 9].

В [10] приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения скалярных и векторных свойств стали 30ХГСА при проведении (P+q)-опытов (растяжение с внутренним давлением) на сложное нагружение по двухзвенным ломаным траекториям непропорционального деформирования в условиях ползучести, которые были получены профессором В.П. Дегтяревым на базе модифицированной машины фирмы «Шопер» [6].

Эксперименты были выполнены при температуре $T = 550^\circ\text{C}$ на тонкостенных цилиндрических образцах с длиной рабочей части $l = 120$ мм, толщиной стенки $h = 1$ мм и радиусом срединной поверхности $R = 40,5$ мм, изготовленных из стали 30ХГСА в состоянии поставки. Назначение указанной температуры обусловлено стремлением получить такое состояние материала, которое характеризуется наличием развитой ползучести. Образцы нагревали до температуры $T = 550^\circ\text{C}$ за 40–45 минут и выдерживали до начала испытаний в течение 25–30 минут.

При обработке экспериментальных данных принималось условие несжимаемости ($e = 0$) и считалось, что $\sigma_{33} = 0$ [6].

При численном моделировании экспериментальных процессов с использованием развитых определяющих соотношений вязкопластичности задавались экспериментальные траектории деформирования $e_{ij}(t)$, а траектории напряжения находились в результате интегрирования определяющих соотношений вязкопластичности по заданной истории изменения e_{ij} («жесткое» нагружение). Полученные численные результаты сравнивались с экспериментальными данными.

В первом примере представлены результаты исследований по изучению кратковременной ползучести стали 30ХГСА в случае простого нагружения (одноосное растяжение) с целью оценки влияния скорости деформирования. При температуре $T = 550^\circ\text{C}$ были испытаны девять образцов при скоростях деформации $0,833 \cdot 10^{-4}$, $0,833 \cdot 10^{-5}$ и $0,275 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ соответственно (по три образца на каждую скорость деформации).

Ввиду отсутствия необходимой экспериментальной информации для стали 30ХГСА в расчетах использовались частные варианты определяющих соотношений термопластичности и нестационарной ползучести при сложном напряженном состоянии – модели теории течения с нелинейным кинематическим упрочнением. Физико-механические характеристики и материальные параметры определяющих соотношений термовязкопластичности стали 30ХГСА при температуре $T = 550^\circ\text{C}$: $K = 130433 \text{ МПа}$, $G = 60200 \text{ МПа}$, $g_1^p = 25000 \text{ МПа}$, $g_2^p = 450$, $g_1^c = 10000 \text{ МПа}$, $g_2^c = 450$, $\bar{C}_c = 70 \text{ МПа}$, $C_p^0 = 93$, $\lambda_c^{(0)} = 0,00013 \text{ (МПа}\cdot\text{c)}^{-1}$, $\lambda_c^{(1)} = 0,00013 \text{ (МПа}\cdot\text{c)}^{-1}$, $\chi_c^{(1)} = 0$, $\chi_c^{(2)} = 0,02$.

Расчетный анализ процессов деформирования лабораторных образцов с использованием определяющих соотношений термовязкопластичности проводился с использованием программного комплекса EXPMODEL, предназначенного для расчетного моделирования неизотермического вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при произвольном нерегулярном нестационарном термомеханическом нагружении.

Результаты испытаний, их сравнение с полученными численными результатами приведены на рис. 1–4.

На рис. 1–3 представлена программа испытаний в случае одноосного растяжения при различных скоростях деформации. Черной линией отмечены значения полных деформаций e_{11} , а красной и синей линиями отмечены расчетные значения пластических деформаций e_{11}^p и деформаций ползучести e_{11}^c соответственно.

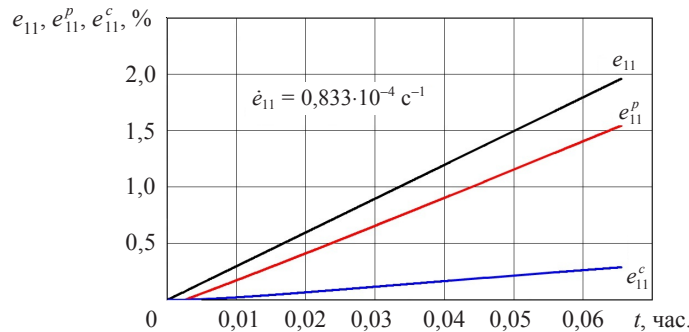


Рис. 1

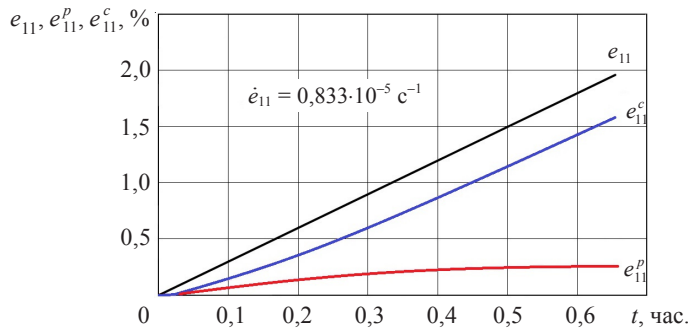


Рис. 2

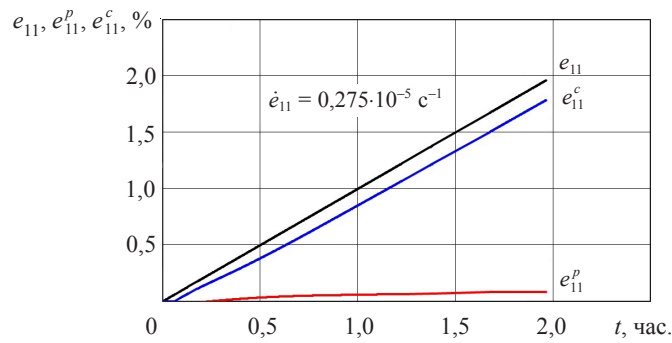


Рис. 3

Видно, что с изменением скорости деформирования происходит перераспределение вклада пластических деформаций и деформаций ползучести в процесс деформирования лабораторного образца. Так, при скорости деформаций $\dot{e}_{11} = 0,833 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ наибольший вклад в процесс деформирования вносят пластические деформации, а деформации ползучести значительно меньше (см. рис. 1). При скорости деформирования $\dot{e}_{11} = 0,275 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ преобладают уже деформации ползучести, а наличием пластических деформаций можно пренебречь (см. рис. 3).

На рис. 4 приведены зависимости $\sigma_{11} = f(e_{11})$ для трех вышеуказанных скоростей деформаций соответственно. Сплошной линией отмечены теоретические результаты, а штриховой – соответствующие опытные данные [6] (каждая экспериментальная кривая построена по результатам испытаний трех образцов). Видно качественное и количественное соответствие опытных и расчетных данных (отличие составляет не более 12,5%).

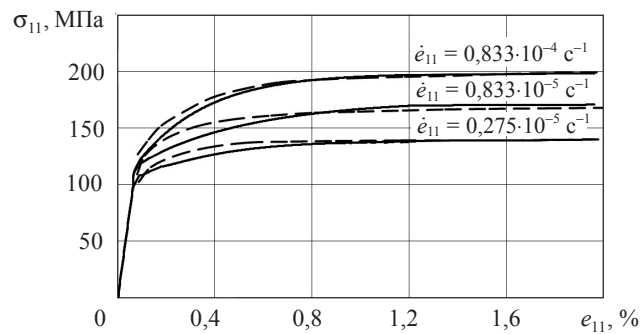


Рис. 4

Во втором примере при постоянной скорости деформаций получили траектории в виде двухзвенных ломаных траекторий непропорционального деформирования.

Трубчатый образец при постоянной температуре $T = 550\text{ }^\circ\text{C}$ растягивали с постоянной скоростью деформаций $\dot{e}_{11} = \text{const}$ до точки А (значение $e_{11} = 0,42\%$), а затем после излома траектории деформирования на 90° реализовывалось пропорциональное деформирование внутренним давлением с постоянной скоростью деформаций $\dot{e}_{22} = \text{const}$ до точки В, при этом деформация e_{11} оставалась постоянной (см. рис. 5–10).

Программа предусматривала изучение кратковременной ползучести стали 30ХГСА при сложном нагружении с учетом влияния скорости деформирования на скалярные и векторные свойства материала. Для вышеописанной траектории деформирования варьировалась скорость деформаций от $\dot{e}_{11} = \dot{e}_{22} = 0,833 \cdot 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ до $\dot{e}_{11} = \dot{e}_{22} = 0,833 \cdot 10^{-6}\text{ c}^{-1}$. Результаты расчетов, их сопоставление с опытными данными представлены на рис. 5–7 для скорости деформаций $\dot{e}_{11} = \dot{e}_{22} = 0,833 \cdot 10^{-4}\text{ c}^{-1}$, а на рис. 8–10 для $\dot{e}_{11} = \dot{e}_{22} = 0,833 \cdot 10^{-6}\text{ c}^{-1}$.

На рис. 5 представлена программа испытаний при различных скоростях деформаций. Черной линией отмечены значения полных деформаций, а красной и синей линиями отмечены расчетные значения пластических деформаций и деформаций ползучести соответственно. На рис. 6 изображен отклик на программу испытаний в пространстве напряжений (штриховой линией отмечены опытные данные [6]).

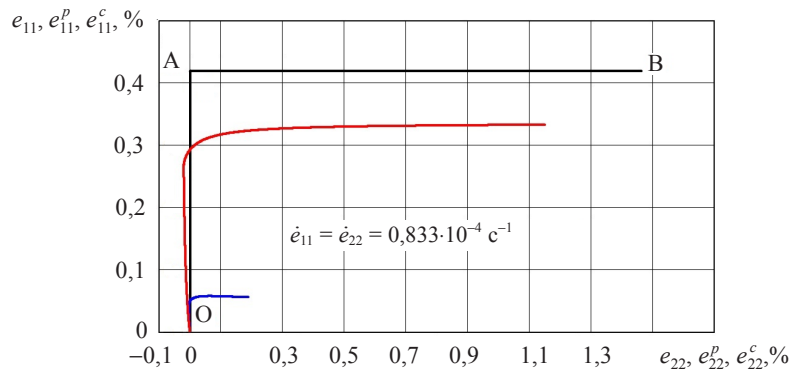


Рис. 5

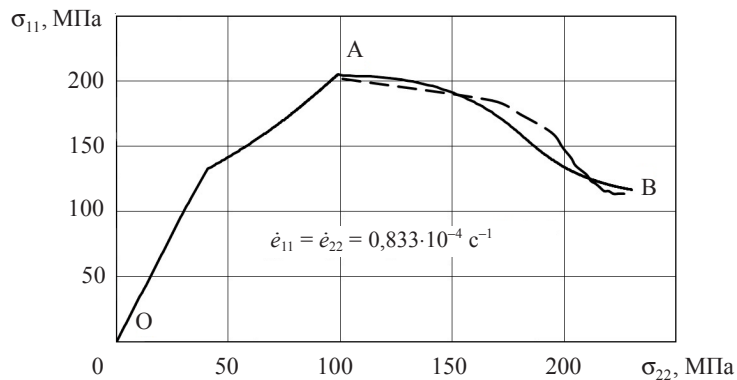


Рис. 6

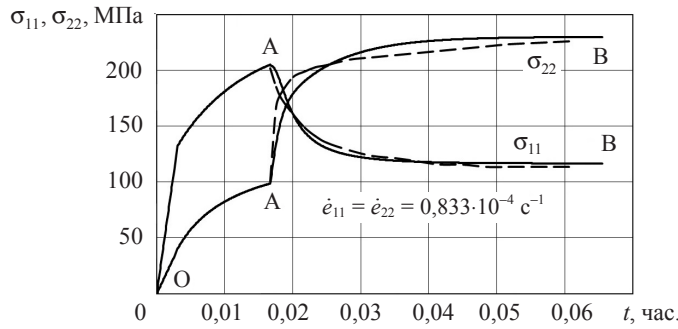


Рис. 7

На рис. 7 показаны графики изменения напряжений σ_{11} и σ_{22} от времени процесса по программе траекторий сложного нагружения по плоским двухзвенным траекториям непропорционального деформирования.

Аналогичные зависимости при скоростях деформаций $\dot{\epsilon}_{11} = \dot{\epsilon}_{22} = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ представлены на рис. 8–10 соответственно. Видно качественное и количественное соответствие опытных и расчетных данных.

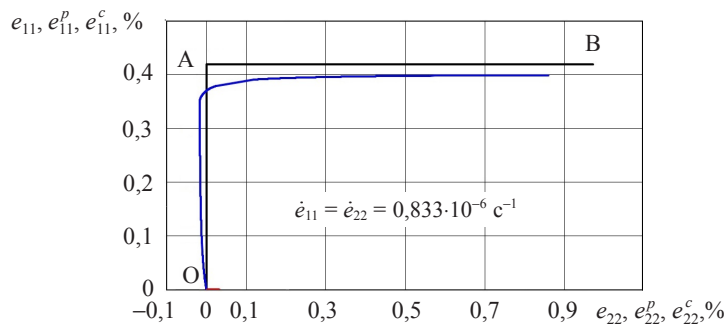


Рис. 8

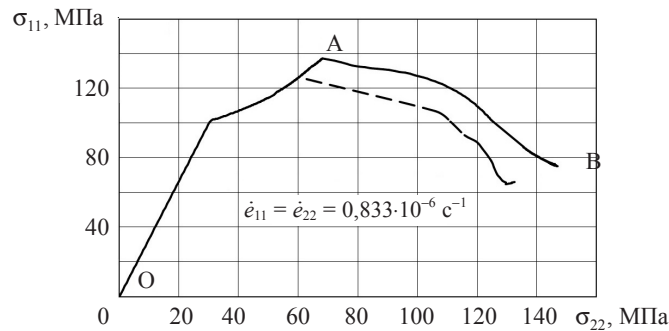


Рис. 9

В целом, сопоставляя полученные численные результаты с экспериментальными данными, можно отметить качественное и количественное соответствие модельных представлений и опытных данных по ползучести металлов при сложном нагружении. Некоторое отличие расчетных значений от экспериментальных данных может быть объяснено, например, неточностями при задании характеристик материала и тем фактом, что при обработке экспериментальных данных принимается условие несжимаемости.

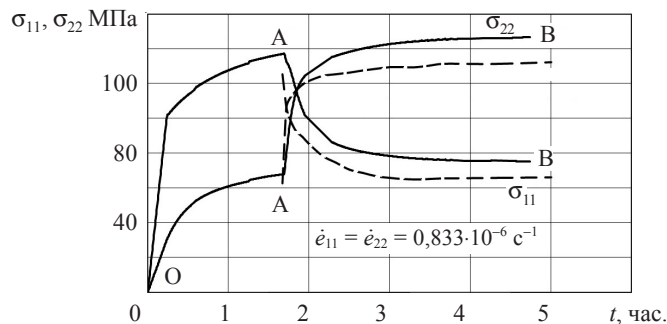


Рис. 10

Видно, что с изменением скорости деформаций вследствие наличия реономных эффектов изменяется уровень напряжений (см. рис. 7–10) и происходит перераспределение вклада пластических деформаций и деформаций ползучести в общий процесс деформирования лабораторного образца.

Заключение

Проведена оценка достоверности определяющих соотношений термовязкопластичности [1, 9–11] путем сопоставления результатов численных расчетов с опытными данными по кратковременной ползучести стали 30ХГСА при сложном нагружении, которая подтвердила правильность моделирования сложного вязкопластического деформирования конструкционных материалов (металлов и их сплавов) и методики определения материальных параметров и скалярных функций развитых определяющих соотношений.

Показана существенная зависимость изменения характеристик пластичности и ползучести от скорости деформации. Так, в экспериментах на кратковременную ползучесть стали 30ХГСА при температуре $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ по двухзвенным ломаным траекториям непропорционального деформирования при скорости деформаций $0,833 \cdot 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ доминирующими оказываются склерономные эффекты (пластичность), а реономные эффекты оказываются менее существенны. При скорости деформаций $0,833 \cdot 10^{-6}\text{ c}^{-1}$ картина деформирования меняется на противоположную: доминирующими оказываются реономные эффекты (ползучесть), а эффектами пластичности можно пренебречь. Все это указывает на необходимость совместного интегрирования определяющих соотношений термопластичности и нестационарной ползучести при исследовании процессов деформирования при повышенных температурах с различными скоростями деформаций.

Список литературы

1. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
2. Бойл Дж., Спенс Дж. *Анализ напряжений при ползучести*. М.: Мир, 1986. 360 с.
3. Работнов Ю. Н. *Ползучесть элементов конструкций*. М.: Наука, 1966. 752 с.
4. Гохфельд Д.А., Садаков О.С. *Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях*. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.
5. Локощенко А.М. *Ползучесть и длительная прочность металлов*. М.: Физматлит, 2016. 504 с.
6. Дегтярев В.П. *Пластичность и ползучесть машиностроительных конструкций*. М.: Машиностроение, 1967. 130 с.

7. Пежина П. *Основные вопросы вязкопластичности*. М.: Мир, 1968. 249 с.
8. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Inter. J. of Plasticity*. 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302.
9. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. *Прикладная теория вязкопластичности*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 318 с.
10. Волков И.А., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Шишулин Д.Н., Сметанин И.В. Определенные соотношения нестационарной ползучести при сложном напряженном состоянии. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №4. С. 436–451.
11. Волков И.А., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Емельянов А.А., Тарасов И.С., Гусева М.А. Программная реализация процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при термомеханическом нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №2. С. 188–207.

References

1. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Urvneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami* [Equations of State of Viscoelasticoplastic Environments with Injuries]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).
2. Boyle J.T., Spence J. *Analiz napryazheniy pri polzuchesti* [Stress Analysis for Creep]. Moscow. Mir Publ. 1986. 360 p. (In Russian).
3. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest' elementov konstruksiy* [Creep of Structural Elements]. Moscow. Nauka Publ. 1966. 752 p. (In Russian).
4. Gokhfeld D.A., Sadakov O.S. *Plastichnost' i polzuchest' elementov konstruksiy pri povtornykh nagruzheniyakh* [Plasticity and Creep of Structural Elements under Repeated Loading]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1984. 256 p. (In Russian).
5. Lokoschenko A.M. *Polzuchest' i dlitel'naya prochnost' metallov* [Creep and Long-term Metal Durability]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2016. 504 p. (In Russian).
6. Degtiarev V.P. *Plastichnost' i polzuchest' mashinostroitel'nykh konstruksiy* [Plasticity and Creep of Engineering Structures]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1967. 130 p. (In Russian).
7. Perzhina P. *Osnovnye voprosy vyazkoplastichnosti* [Fundamental Problems in Viscoplasticity]. Moscow. Mir Publ. 1968. 249 p. (In Russian).
8. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Inter. J. of Plasticity*. 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302.
9. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G. *Prikladnaya teoriya vyazkoplastichnosti* [Applied Theory of Viscoplasticity]. Nizhni Novgorod. NNGU Publ. 2015. 318 p. (In Russian).
10. Volkov I.A., Igumnov L.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N., Smetanin I.V. Opredelyayushchie sootnosheniya nestatsionarnoy polzuchesti pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Defining relation of transient creep under complex stress state]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2016. Vol. 78. No 4. P. 436–451 (In Russian).
11. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G., Kazakov D.A., Yemelyanov A.A., Tarasov I.S., Guseva M.A. Programmaya realizatsiya protsessov vyazkoplasticheskogo deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy v konstruksionnykh splavakh pri termomekhanicheskom nagruzhenii [Software implementation of viscoplastic deformation and damage accumulation processes in structural alloys under thermal-mechanical loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2016. Vol. 78. No 2. P. 188–207 (In Russian).

LAWS OF CHANGE OF CREEP AND PLASTICITY CHARACTERISTICS IN EXPERIMENTS WITH SHORT-TERM CREEP UNDER COMPLEX LOADING

Volkov I.A.^{1,2}, Igumnov L.A.², Shishulin D.N.³, Tarasov I.S.¹, Smetanin I.V.¹

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

²*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

³*Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The issue of theoretically and experimentally studying interconnected processes of plasticity and creep in structural materials (metals and their alloys) in various loading conditions, stressed state and heating is discussed.

A mathematical model describing interrelated processes of thermal plasticity and transient creep in metals under complex loading is concisely presented, as well as an algorithm for integrating it.

Results of numerically modeling short-term creep of the 30HGSA steel under complex loading following bilinear broken trajectories of non-proportional deformation are given.

The obtained results are compared with the data of full-scale experiments. Special attention is paid to studying the change of plasticity and creep characteristics as a function of strain rate.

The assessment of the adequacy of the considered defining relations of thermal viscoplasticity by comparing the numerical results with the test data on short-term creep of the 30HGSA steel showed that they can be used for modeling complex viscoplastic deformation of structural materials (metals and their alloys).

Substantial change of the plasticity and creep characteristics as a function of strain rate is shown,

Keywords: plasticity, transient creep, defining relations, modeling, strain rate, temperature, numerical and full-scale experiment, complex loading, bilinear trajectory, plastic flow theory.