

УДК 539.3

ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ*

© 2016 г. **Волков И.А.^{1,2}, Игумнов Л.А.², Казаков Д.А.²,
Шишулин Д.Н.³, Сметанин И.В.¹**

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

²*Научно-исследовательский институт механики
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 18.10.2016

Рассматривается проблема оценки прочности и ресурса ответственных инженерных объектов, эксплуатационные свойства которых характеризуются многопараметрическими нестационарными термомеханическими воздействиями, приводящими к деградации начальных прочностных свойств конструкционных материалов (металлов и их сплавов) по механизмам усталости и ползучести материала.

Развита математическая модель, описывающая процессы нестационарной ползучести металлов при сложном напряженном состоянии. Разработана экспериментально-теоретическая методика определения материальных параметров и скалярных функций определяющих соотношений нестационарной ползучести.

Приводятся результаты численного моделирования процесса ползучести стали 304 при сложных режимах блочного термоциклического деформирования. Полученные численные результаты сравниваются с данными натурных экспериментов. Особое внимание уделяется вопросам моделирования ползучести для сложных процессов деформирования, сопровождающихся вращением главных площадок тензоров напряжений, деформаций и деформаций ползучести.

Ключевые слова: нестационарная ползучесть, длительная прочность, повреждение, ресурс, математическое моделирование, базовый эксперимент, материальные параметры, численный и натуральный эксперименты.

Введение

Особенностью работы элементов конструкций, разрушающихся в результате малоциклового усталости (МЦУ), является нестационарность теплового и силового воздействий, которые определяют циклический характер процесса вязкопластическо-

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

го деформирования материала в зонах концентрации напряжений и включают выдержки различной длительности при различных уровнях напряжений и температуры [1, 2]. Циклический характер вязкопластической деформации обуславливает интенсивное накопление повреждений, вызванное образованием, ростом и слиянием микродефектов, что приводит к разрушению материала за относительно небольшое ($N_f \leq 10^4$) число циклов нагружения. Основными факторами, влияющими на процесс накопления повреждений, являются история вязкопластического деформирования (форма цикла, вид траектории деформирования), изменение температуры T (форма температурного цикла, максимальная температура в цикле T_{\max}) и время нагружения (продолжительность цикла, время выдержки). Экспериментальные результаты исследования малоциклового низкочастотного усталости [3] свидетельствуют о том, что при термоциклическом нагружении с различной длительностью циклов характер разрушения различается вследствие различия комбинаций двух основных видов повреждения: процесса повреждения, вызванного ползучестью материала и развивающегося в основном по границам зерен (межкристаллитное разрушение), и процесса повреждения, вызванного термопластической деформацией (транскристаллитное разрушение). В циклах с длительными выдержками при высоких температурах и больших амплитудах напряжений преобладает длительная прочность (разрушение первого типа). При высокочастотных пилообразных циклах прочность материала определяется его сопротивлением малоцикловому разрушению (второй тип разрушения). В промежуточной области на прочность материала влияют оба механизма повреждения материала [3].

Поскольку процессы накопления повреждений тесно связаны с кинетикой напряженно-деформированного состояния (НДС), то точность расчетных оценок прочности и ресурса конструктивных элементов будет зависеть от того, насколько определяющие соотношения достоверно описывают процессы деформирования опасных зон элементов конструкций в заданных условиях эксплуатации. Такие параметры процесса вязкопластического деформирования, как длина и вид траектории деформирования, вид напряженного состояния, история его изменения и др., существенно влияют на скорости протекания процессов накопления повреждений [1, 2].

Ресурс элементов конструкций, работающих в условиях повышенных температур T ($T > 0,5T_{\text{пл}}$, $T_{\text{пл}}$ – температура плавления) и циклических механических воздействий, определяется в основном физическими процессами МЦУ и накопления повреждений в результате ползучести, которые приводят к одному из наиболее опасных типов разрушения – хрупкому разрушению конструкций, изначально изготовленных из пластичных материалов.

Особенностью разрушения элементов конструкций в результате действия МЦУ является постепенный характер накопления повреждений от циклического действия пластических деформаций в зонах конструктивной концентрации повреждений при большом общем запасе прочности [2–4].

Зависимость долговечности материала от длительности (частоты) цикла и от наличия выдержек напряжения в цикле при повышенных постоянных или меняющихся температурах из диапазона $(0,35-0,7)T_{\text{пл}}$ обусловлена накоплением повреждений от развивающихся деформаций ползучести.

Для описания стандартных кривых ползучести предложено много упрощенных одномерных определяющих уравнений. Однако эти формулы пригодны только для случая постоянных напряжений и представляют собой попытку математической формализации первой и второй стадий ползучести [5–10].

При переменных напряжениях получили развитие модели временного и деформационного упрочнения [9, 10]. Однако модели ползучести в форме моделей временного и деформационного упрочнений предназначены лишь для описания первой и второй стадий. Они не охватывают всех стадий деформации ползучести, а также не описывают важного явления обратной ползучести при разгрузке. Поэтому в ряде случаев необходимо строить более сложные соотношения [11–18]. В опубликованных работах было предложено немало разных формулировок, однако существует разделяемое многими исследователями мнение, что соотношения, основанные на обобщении моделей упрочнения путем применения концепции «скрытых» или «внутренних» параметров, могут дать вполне удовлетворительное описание экспериментальных данных. Подобные соотношения обладают двумя важными преимуществами: позволяют охватить широкий диапазон поведения материалов, включая склерономную пластичность и ползучесть, и в то же время очень удобны для анализа напряжений.

Для моделирования процессов нестационарной ползучести при сложном напряженном состоянии необходимо задать законы изменения параметров состояния. Предполагается, что эти закономерности определяются двумя противоположными физическими механизмами: упрочнением и разупрочнением (на стадии установившейся ползучести механизмы упрочнения и разупрочнения взаимно компенсируются).

Такой подход имеет аналог в математической теории пластичности (теории течения). Конкретный вид определяющих соотношений, как правило, определяется в опытах с одноосным напряженным состоянием.

В настоящей статье на базе работ отечественных и зарубежных исследователей [1, 11–18] развита математическая модель нестационарной ползучести при сложном напряженном состоянии. Путем сопоставления опытных и расчетных данных по ползучести нержавеющей стали 304 при циклическом многоосном нагружении [19] проведена оценка достоверности и определены границы применимости развитых определяющих соотношений нестационарной ползучести при многоосном напряженном состоянии.

1. Определяющие соотношения нестационарной ползучести

Основные положения варианта уравнений нестационарной ползучести, предложенного Ю.Г. Коротких и развитого в работах его учеников, заключаются в следующем [1, 11]:

1. Рассматриваются начально изотропные среды.
2. Тензоры деформаций и скоростей деформаций представляют собой сумму «мгновенной» и «временной» составляющих. «Мгновенная» составляющая состоит из упругих компонент, не зависящих от истории деформирования и определяющих конечное состояние процесса, и пластических компонент, зависящих от истории процесса деформирования. Временная составляющая (деформаций ползучести) описывает временную зависимость процессов деформирования при низких скоростях нагружения.
3. Эволюция эквипотенциальной поверхности текучести описывается изменением ее радиуса C_c и перемещением ее центра ρ_{ij}^c .
4. Изменение объема элемента тела упруго, то есть $e_{ii}^p = e_{ii}^c = 0$.

5. Рассматриваются процессы деформирования, характеризующиеся малыми деформациями.

Принимается, что компоненты тензора деформаций e_{ij} и их скорости \dot{e}_{ij} являются суммами упругих составляющих e_{ij}^e, \dot{e}_{ij}^e , пластических составляющих e_{ij}^p, \dot{e}_{ij}^p и деформаций ползучести e_{ij}^c, \dot{e}_{ij}^c , то есть:

$$e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^p + e_{ij}^c, \quad \dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^e + \dot{e}_{ij}^p + \dot{e}_{ij}^c, \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Связь между тензором напряжений и тензором упругих деформаций на базе уравнений термоупругости определяется зависимостями:

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

где σ, e – шаровые, а σ'_{ij}, e'_{ij} – девиаторные компоненты тензоров напряжений σ_{ij} и деформаций e_{ij} соответственно; $G(T)$ – модуль сдвига; $K(T)$ – объемный модуль упругости; $\alpha(T)$ – коэффициент температурного расширения.

Для описания процессов ползучести вводим в пространстве напряжений эквивалентные поверхности ползучести F_c , имеющие общий центр ρ_{ij}^c и различные радиусы C_c , определяемые текущим напряженным состоянием:

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

согласно ассоциированному закону

$$\dot{e}_{ij}^c = \lambda_c \frac{\partial F_c^{(i)}}{\partial S_{ij}^c} = \lambda_c S_{ij}^c, \quad (3)$$

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

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

$$F_c^{(0)} = \bar{S}_{ij}^c \bar{S}_{ij}^c - \bar{C}_c^2 = 0, \quad \bar{S}_{ij}^c = \bar{\sigma}'_{ij} - \rho_{ij}^c, \quad (4)$$

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

Принимаем, что

$$\dot{\chi}_c = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^c \dot{e}_{ij}^c \right)^{1/2}, \quad \chi_c = \int_0^t \dot{\chi}_c dt, \quad \psi_c = \frac{\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c - \bar{C}_c}}{C_c}, \quad (5)$$

где C_c – экспериментально определяемая функция температуры T и χ_c .

Эволюционное уравнение для изменения координат центра поверхности ползучести имеет вид [1, 11]:

$$\dot{\rho}_{ij}^c = g_1^c \dot{e}_{ij}^c - g_2^c \rho_{ij}^c \dot{\chi}_c, \quad (6)$$

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

Конкретизируя соотношение (3), закон градиентальности можно представить в виде:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \lambda_c(\psi_c, T) S_{ij}^c = \lambda_c \psi_c S_{ij}^c = \lambda_c \frac{\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c}{C_c} S_{ij}^c. \quad (7)$$

Здесь λ_c – экспериментально определяемая функция, равная нулю при $\psi_c \leq 0$.
Интенсивность тензора скорости деформации ползучести имеет вид:

$$\dot{\epsilon}_u^c = \lambda_c \cdot \frac{\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c}{C_c} S_u^c. \quad (8)$$

С учетом (8) выражение для длины траектории деформаций ползучести примет вид:

$$\dot{\chi}_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\epsilon}_u^c = \sqrt{\frac{2}{3}} \lambda_c \left(\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c \right), \quad (9)$$

откуда

$$\lambda_c = \frac{\dot{\chi}_c}{\sqrt{2/3} \left(\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c \right)}. \quad (10)$$

Зависимость χ_c от времени процесса t при $S_u^c = \text{const}$ при многоосном деформировании по лучевой траектории имеет вид, представленный на рис. 1.

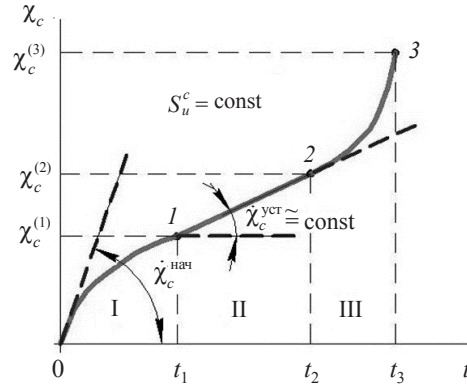


Рис. 1

На кривой $\chi_c(t)$ с определенной долей условности можно выделить три участка:

I – участок неустановившейся ползучести от 0 до $\chi_c^{(1)}$, скорость деформации ползучести $\dot{\chi}_c$ убывает;

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

III – участок неустановившейся ползучести $\chi_c > \chi_c^{(2)}$, деформации ползучести быстро растут (участок предшествует разрушению), $\dot{\chi}_c$ резко возрастает.

Длины участков существенным образом зависят от величины S_u^c .

При одноосном напряженном состоянии лабораторного образца имеем:

$$\dot{\chi}_c = \dot{\epsilon}_{11}^c, \quad \bar{C}_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \bar{\sigma}_c, \quad (11)$$

$$\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\sigma'_{11} - \frac{3}{2} \rho_{11}^c - \bar{\sigma}_c \right), \quad (12)$$

$$\dot{e}_{11}^c = \frac{2}{3} \lambda_c \left(\sigma'_{11} - \frac{3}{2} \rho_{11}^c - \bar{\sigma}_c \right), \quad (13)$$

$$\dot{\chi}_c = \dot{e}_{11}^c \chi_c^{(1)} = e_{11}^{c(1)}, \quad \chi_c^{(2)} = e_{11}^{c(2)}, \quad \chi_c^{(3)} = e_{11}^{c(3)},$$

где $\bar{\sigma}_c = \bar{\sigma}_c(e_{11}^c, T)$ – предел ползучести материала, соответствующий нулевой скорости ползучести; зависимость $\chi_c(t)$ эквивалентна зависимости $e_{11}^c(t)$.

На втором участке ($e_{11}^{c(1)} \leq e_{11}^c \leq e_{11}^{c(2)}$) λ_c^{II} определяется из соотношения (13):

$$\lambda_c^{\text{II}} = \frac{3}{2} \frac{\dot{e}_{11}^{c(\text{уст})}}{\sigma'_{11} - (3/2)\rho_{11}^c - \bar{\sigma}_c}. \quad (14)$$

На первом участке ($0 \leq e_{11}^c \leq e_{11}^{c(1)}$)

$$\dot{e}_{11}^c = \begin{cases} \dot{e}_{11}^{c(\text{нач})} & \text{при } e_{11}^c = 0, \\ \dot{e}_{11}^{c(\text{уст})} & \text{при } e_{11}^c = e_{11}^{c(1)}. \end{cases}$$

Учитывая эти условия, выражение для λ_c^{I} на первом участке кривой ползучести можно представить в виде:

$$\lambda_c^{\text{I}} = \lambda_c^{(0)} \cdot \left(1 - \frac{e_{11}^c}{e_{11}^{c(1)}} \right) + \lambda_c^{(1)} \frac{e_{11}^c}{e_{11}^{c(1)}}, \quad (15)$$

где

$$\lambda_c^{(0)} = \frac{3}{2} \frac{\dot{e}_{11}^{c(\text{нач})}}{\sigma'_{11} - \bar{\sigma}_c}, \quad \lambda_c^{(1)} = \frac{3}{2} \frac{\dot{e}_{11}^{c(\text{уст})}}{\sigma'_{11} - (3/2)\rho_{11}^c - \bar{\sigma}_c} \quad (16)$$

– значения параметра λ_c в точках 0 и 1 на рис. 1.

На третьем участке ($e_{11}^{c(2)} < e_{11}^c \leq e_{11}^{c(3)}$), предшествующем разрушению,

$$\lambda_c^{\text{III}} = \frac{\lambda_c^{\text{II}}}{(1 - \omega)^{r_c}}, \quad (17)$$

где ω – величина поврежденности, а r_c – параметр материала [1].

Обобщая полученные соотношения на неодномерный случай, будем иметь:

$$\lambda_c = \begin{cases} 0, & \psi_c \leq 0 \vee \chi_c = 0, \\ \lambda_c^{\text{I}}, & 0 \leq \chi_c \leq \chi_c^{(1)}, \\ \lambda_c^{\text{II}}, & \chi_c^{(1)} \leq \chi_c \leq \chi_c^{(2)}, \\ \lambda_c^{\text{III}}, & \chi_c^{(2)} \leq \chi_c \leq \chi_c^{(3)}. \end{cases} \quad (18)$$

Уравнения (1)–(18) описывают неустановившиеся и установившиеся участки кривой ползучести при разных уровнях напряжений и основные эффекты процесса ползучести при сложном нагружении.

При разработке моделей деформирования и разрушения 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 эффек-

тивностью 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 термоползучести при сложном напряженном состоянии (1)–(18) 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 нестационарной ползучести при сложном напряженном состоянии.

2. Определение материальных параметров модели термоползучести

Для практического применения уравнений термоползучести (1)–(18) необходимо иметь следующую информацию:

- зависимости $G(T)$, $K(T)$, $\alpha(T)$, где T – температура;
- зависимость текущего радиуса поверхности ползучести, соответствующего нулевой скорости ползучести, $\bar{C}_c = \bar{C}_c(\chi_c, T)$;
- зависимость $\lambda_c = \lambda_c(T)$ для различных участков кривой ползучести;
- зависимости модулей кинематического упрочнения $g_1^c(T)$, $g_2^c(T)$.

Материальные параметры эволюционных уравнений термоползучести определяются из базовых экспериментов [1, 11].

В качестве основных базовых экспериментов принимаются эксперименты на одноосное растяжение-сжатие цилиндрических лабораторных образцов.

Основные типы базовых экспериментов – изотермические эксперименты при постоянных базовых температурах T_j ($j = 1, 2, \dots$).

Типы образцов – цилиндрический сплошной и цилиндрический трубчатый. Выбранные типы образцов обеспечивают однородное распределение полей напряжений деформаций и температур в пределах рабочей части, исключают возможность потери устойчивости и формоизменения образца при знакопеременном нагружении, максимально исключают влияние концентраторов на НДС при переходе от рабочей части образца к утолщенным местам [11].

Для определения модулей кинематического (анизотропного) упрочнения $g_1^c(T)$ и $g_2^c(T)$ и зависимости для радиуса поверхности ползучести, соответствующего нулевой скорости ползучести, образец нагревается до значения температуры «базового» эксперимента $T = T_j = \text{const}$ и проводятся испытания на ползучесть при одноосном напряженном состоянии по схеме «мягкого» нагружения.

Сначала образец нагружается до величины напряжения $\sigma_{11}^{(1)}$ в точке 1 (рис. 2). Этот уровень напряжений выбирается из анализа имеющегося веера кривых ползучести, полученных при «базовой» температуре $T = T_j$ (кривая ползучести, соответствующая нулевой скорости ползучести). В результате релаксации процесс заканчивается в точке 2 (напряжение $\sigma_{11}^{(2)}$), где скорость деформации ползучести стремится к нулю.

Далее образец нагружается до напряжения обратного знака $\sigma_{11}^{(3)}$ (точка 3 на рис. 2) и в результате процесса релаксации оказывается в точке 4. Таким образом, напряжения $\bar{\sigma}_{11}^{(0)+}$ (точка 2) и $\bar{\sigma}_{11}^{(0)-}$ (точка 4) характеризуют (с определенным до-

пуском на остаточную деформацию) начальную верхнюю и нижнюю границы поверхности ползучести, соответствующие нулевой скорости ползучести.

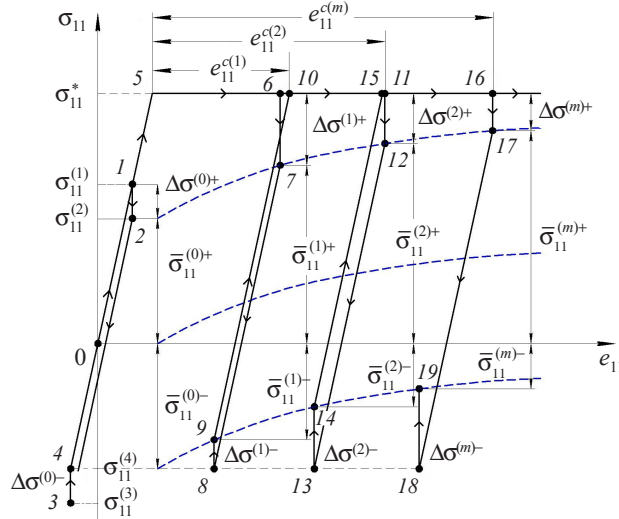


Рис. 2

Для определения трансформации поверхности ползучести на том же самом образце при заданном напряжении $\sigma_{11}^* = \text{const}$ проводится ряд аналогичных действий после достижений назначенных уровней деформаций ползучести $e_{11}^{c(1)}$, $e_{11}^{c(2)}$, ..., $e_{11}^{c(m)}$. Полученный таким образом набор точек 2, 7, 12, 17, ... характеризует изменение верхней (при растяжении) границы поверхности ползучести, в зависимости от накопленной деформации ползучести. Точки 4, 8, 13, 19, ... характеризуют изменение нижней (при сжатии) границы поверхности ползучести.

Таким образом, по результатам эксперимента при базовых постоянных температурах $T = T_j$ определяются:

- геометрическое место пределов ползучести при растяжении с заданным допуском на остаточную деформацию;
- геометрическое место обратных пределов ползучести при сжатии.

Зависимость радиуса поверхности ползучести, соответствующей нулевой скорости деформации ползучести, определяется по формуле:

$$\bar{C}_c = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\sigma_{11}^{(m)+} + \sigma_{11}^{(m)-}}{2}}, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (19)$$

Для определения модулей кинематического (анизотропного) упрочнения $g_1^c(T)$ и $g_2^c(T)$ необходимо проинтегрировать соотношение (6) при $T = T_j = \text{const}$.

Будем иметь:

$$\rho_{11}^c = \frac{g_1^c}{g_2^c} \left(1 - e^{-g_2^c e_{11}^c} \right), \quad (20)$$

где e – основание натуральных логарифмов, g_1^c – тангенс угла наклона касательной к кривой $\rho_{11}^c \sim e_{11}^c$ в начале координат (рис. 3), $\rho_{\text{max}}^c = g_1^c / g_2^c$ – предельное асимптотическое значение ρ_{11}^c при данной температуре $T = T_j$.

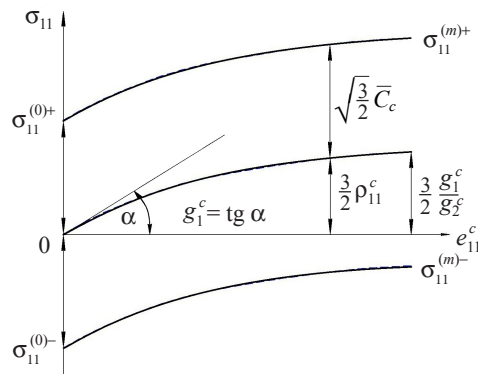


Рис. 3

Отсюда определяются модули g_1^c и g_2^c анизотропного (кинематического) упрочнения.

3. Численные результаты

В статье [19] представлены результаты экспериментальных исследований трубчатых лабораторных образцов из нержавеющей стали 304 на ползучесть в условиях многоосного напряженного состояния. Испытания проводились при температуре $T = 650\text{ }^\circ\text{C}$ при периодическом чередовании двух видов напряженного состояния с различными направлениями главных осей тензора напряжений.

В испытаниях использовались тонкостенные трубчатые образцы с наружным диаметром $d = 21 \pm 0,05$ мм, толщиной стенки $h = 1 \pm 0,05$ мм и рабочей длиной $l = 98$ мм.

Эксперименты проводили по схеме мягкого нагружения. Для испытаний в условиях совместного действия на образец осевого и крутящего усилий при повышенных температурах использовали испытательную машину на сложное нагружение, снабженную электропечью. Температуру образцов измеряли тремя термопарами, приваренными точечной сваркой в трех точках вдоль рабочей части образца (отклонение от температуры $650\text{ }^\circ\text{C}$ составляет не более $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ по длине образца). Осевые и сдвиговые деформации измерялись экстензометром.

Перед опытами образцы выдерживали при температуре $T = 650\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 22 часов. На рис. 4 представлена диаграмма нагружения образца во времени. Каждый цикл повторяющегося многоосного нагружения состоит из чистого кручения $\bar{\sigma}_A$ в течение времени t^* с последующей полной разгрузкой и совместного растяжения с кручением $\bar{\sigma}_B$ в течение t^* с последующей разгрузкой. Векторы $\bar{\sigma}_A$ и $\bar{\sigma}_B$ имеют одинаковые величины по различным направлениям (θ – угол между векторами, см. рис. 4). Такой цикл нагружения повторялся 5 раз при значении $t^* = 8$ часов и $|\bar{\sigma}_A| = |\bar{\sigma}_B| = 173,3$ МПа, что близко к пределу текучести стали 304 при $T = 650\text{ }^\circ\text{C}$.

Расчет процесса циклического многоосного нагружения проводился по программе EXPMODEL [20], предназначенной для расчетного моделирования неэластического вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при произвольном нерегулярном нестационарном термомеханическом нагружении. Физико-механические характеристики стали 304 и материальные параметры модели нестационарной ползучести при температуре $T = 650\text{ }^\circ\text{C}$ таковы: $K = 124$ ГПа, $G = 56,5$ ГПа, $\alpha \cdot 10^5 =$

$= 1,88 \text{ град}^{-1}, g_1 = 10 \text{ ГПа}, g_2 = 470, \chi_c^{(1)} = 0,003, \chi_c^{(2)} = 0,025, \lambda_c^{(0)} \cdot 10^5 = 3,0 \text{ (МПа} \cdot \text{с)}^{-1}, \lambda_c^{(1)} \cdot 10^5 = 1,2 \text{ (МПа} \cdot \text{с)}^{-1}.$

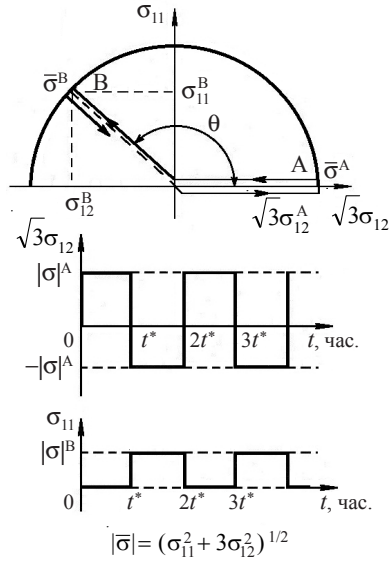


Рис. 4

Зависимость изменения радиуса поверхности ползучести \bar{C}_c от длины траектории деформаций ползучести стали 304 при температуре $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ приведены в таблице 1.

Таблица 1

χ_c	0	0,0005	0,001	0,0015	0,002	0,0025	0,003	0,004	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04
$\bar{C}_c, \text{ МПа}$	74,0	76,0	77,0	78,0	79,0	79,5	80,0	81,0	81,3	81,6	81,6	81,6	81,6

На рис. 5 представлены результаты испытаний на ползучесть при одноосном растяжении и чистом кручении. Здесь сплошными линиями отмечены результаты численного моделирования с использованием определяющих соотношений нестационарной ползучести (1)–(18), а маркерами – соответствующие экспериментальные данные. Видно качественное и количественное соответствие опытных и расчетных данных.

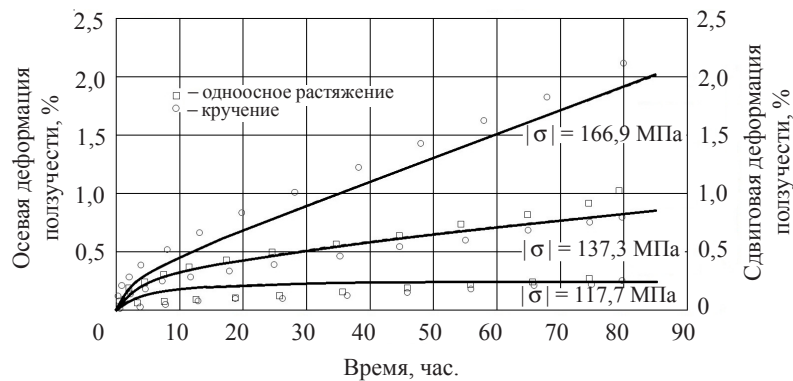


Рис. 5

На рис. 6–13 представлены результаты испытаний на ползучесть при $\theta = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 180^\circ$.

На рис. 6 представлены зависимости осевой (кривые 1) и сдвиговой (кривые 2) деформаций ползучести при повторяющемся многоосном нагружении для угла $\theta = 30^\circ$. Здесь и далее сплошными линиями отмечены результаты численного моделирования с использованием определяющих соотношений нестационарной ползучести (1)–(18), а штриховыми линиями – соответствующие экспериментальные данные. Видно, что при $\theta = 30^\circ$ после поворота вектора напряжений $\bar{\sigma}_B$ скорость деформации несколько увеличивается (см. рис. 4).

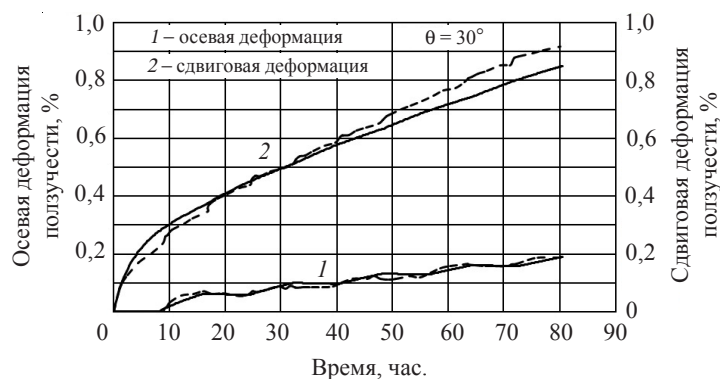


Рис. 6

На рис. 7, 8 представлены зависимости осевой и сдвиговой деформаций ползучести при повторяющемся многоосном нагружении для угла $\theta = 90^\circ$.

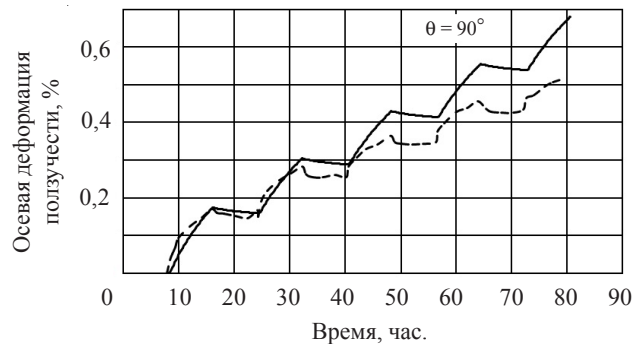


Рис. 7

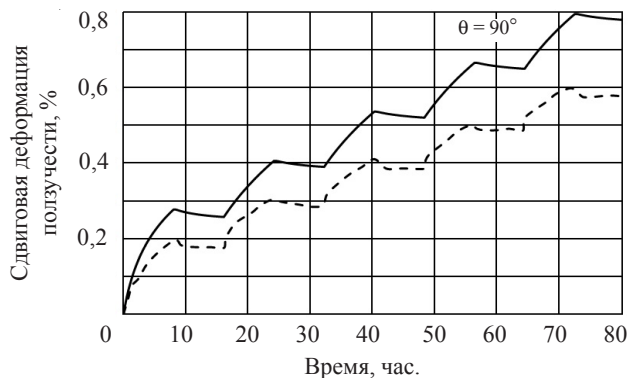


Рис. 8

Видно, что для этого угла наблюдается временное увеличение скорости осевой и сдвиговой деформации после смены растяжения кручением и кручения растяжением. Это переходное увеличение скорости деформаций уменьшается по мере увеличения продолжительности нагружения.

На рис. 9–11 представлены зависимости осевой и сдвиговой деформаций ползучести при повторяющемся многоосном нагружении для углов вращения $\theta = 150$ и 180° (знакопеременное кручение) соответственно. Видно, что при больших углах вращения происходит заметное временное увеличение скорости деформаций после каждого поворота вектора напряжений, что позволяет сделать вывод о влиянии угла θ на процесс разрушения материала (с увеличением угла вращения разупрочнение становится более ярко выраженным). Кривые ползучести после каждой перемены знака напряжения почти идентичны кривой после начального нагружения.

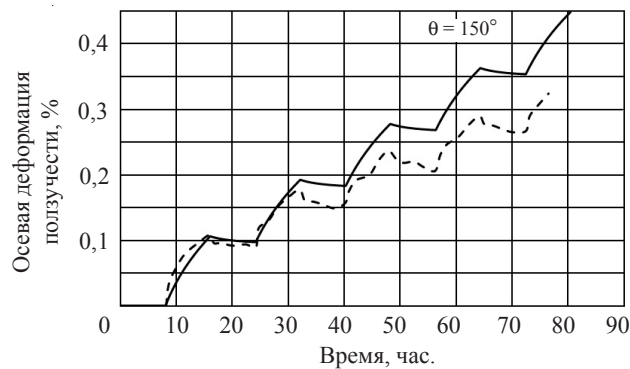


Рис. 9

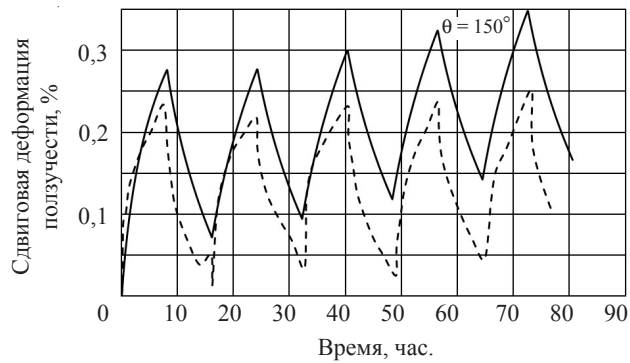


Рис. 10

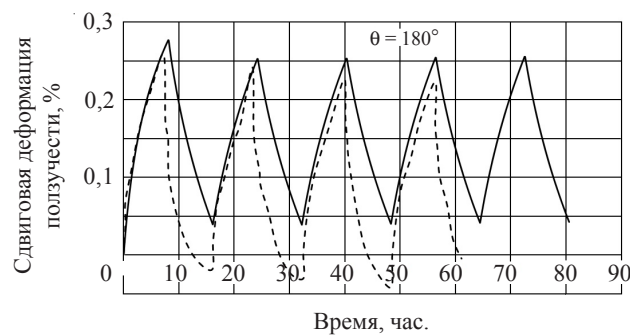


Рис. 11

Другой существенной особенностью деформаций ползучести при непропорциональном нагружении является неколлинеарность векторов напряжений и скоростей деформаций, что накладывает дополнительные требования на определяющие соотношения нестационарной ползучести при сложном напряженном состоянии.

На рис. 12 и 13 сопоставлены расчетные и экспериментальные траектории деформаций ползучести при $\theta = 90$ и 150° . Видно, что вектор скорости деформаций ползучести $\dot{\bar{\epsilon}}^c$ становится неколлинеарным вектору напряжений $\bar{\sigma}_B$ сразу же после вращения $\bar{\sigma}$. Однако это неколлинеарность имеет тенденцию к постепенному исчезновению после вращения и вектора напряжений $\bar{\sigma}_B$ по мере протекания процесса ползучести.

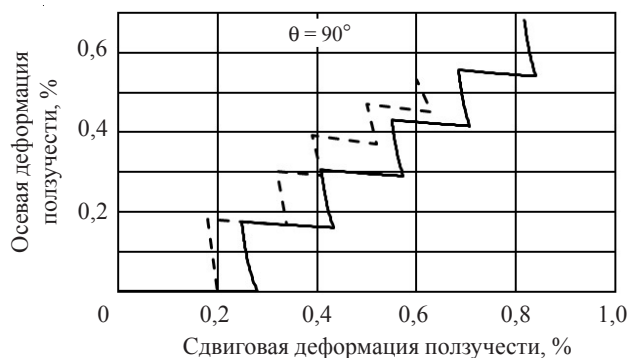


Рис. 12

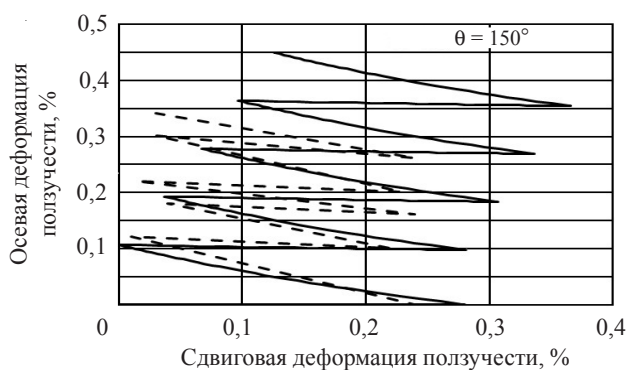


Рис. 13

Сравнивая полученные численные результаты с экспериментальными данными, можно отметить качественное и количественное соответствие модельных представлений и опытных данных [19] по нестационарной ползучести при циклическом многоосном нагружении стали 304. Некоторые отличия расчетных данных от экспериментальных могут быть объяснены:

- неточностью при задании материальных параметров и скалярных функций;
- представлением информации в [19] без учета разброса экспериментальных данных в пределах каждого отдельного опыта;
- наличием пластической деформации, которая не учитывалась в расчетах, о чем свидетельствуют экспериментальные результаты, представленные в [19];
- предположением о несжимаемости материала при обработке экспериментальных данных [19].

Заключение

Развита математическая модель, описывающая процессы нестационарной ползучести конструкционных материалов (металлов и их сплавов) при сложном нагружении.

Представлена экспериментально-теоретическая методика определения материальных параметров и скалярных функций развитых определяющих соотношений.

Проведено сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных процессов ползучести стали 304 при сложных режимах циклического многоосного нагружения. Показано, что развитый вариант определяющих соотношений нестационарной ползучести позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью описывать процессы ползучести металлов при многоосных напряженных состояниях.

Список литературы

1. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
2. Коллинз Дж. *Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение*. М.: Мир, 1984. 624 с.
3. Дульнев Р.А., Котов П.И. *Термическая усталость металлов*. М.: Машиностроение, 1980. 200 с.
4. Казанцев А.Г. Исследование взаимодействия малоциклового усталости и ползучести при неизотермическом нагружении. *Проблемы прочности*. 1985. №5. С. 25–31.
5. Работнов Ю.Н. *Ползучесть элементов конструкций*. М.: Наука, 1966. 752 с.
6. Гохфельд Д.А., Садаков О.С. *Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях*. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.
7. Дегтярев В.П. *Пластичность и ползучесть машиностроительных конструкций*. М.: Машиностроение, 1967. 130 с.
8. Малинин Н.Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. М.: Машиностроение, 1968. 400 с.
9. Локощенко А.М. *Ползучесть и длительная прочность металлов*. М.: Физматлит, 2016. 504 с.
10. Бойл Дж., Спенс Дж. *Анализ напряжений при ползучести*. М.: Мир, 1986. 360 с.
11. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. *Прикладная теория вязкопластичности*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 318 с.
12. Бондарь В.С. *Неупругость. Варианты теории*. М.: Физматлит, 2004. 144 с.
13. Пежина П. *Основные вопросы вязкопластичности*. М.: Мир, 1968. 176 с.
14. Шевченко Ю.Н., Терехов Р.Г. *Физические уравнения термовязкопластичности*. Киев: Наукова думка, 1982. 240 с.
15. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Inter. J. of Plasticity*. 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302.
16. Malinin N.N., Khadjinsky G.M. Theory of creep with anisotropic hardening. *Inter. J. of Mechanical Science*. 1972. Vol. 14. P. 235–246.
17. Миллер А. Математическая модель для монотонного и циклического изменения деформации и деформации ползучести, основанная на анализе неупругой деформации. *Теоретические основы инженерных расчетов. ASME*. 1976. №2. P. 1–20.
18. Krieger R.D., Swearingen J.C., Rohde R.W. A physically-based internal variable model for rate-dependent plasticity. Inelastic behavior of pressure vessel and piping components (Ed. by Chang T.Y. and Krempl E.). *ASME*. 1978. PVP-PB-028. P. 15–28.
19. Охаси, Оно, Каваи. Оценка определяющих уравнений ползучести для нержавеющей стали 304 при повторяющемся многоосном нагружении. *Теоретические основы инженерных расчетов. ASME*. 1982. Т. 104. №3. С. 1–8.

20. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г., 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. *Uravneniya sostoyaniya vyzkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami* [State Equations for Viscoelasticoplastic Media with Injuries]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).
2. Callins J.A. *State Equations for Viscoelasticoplastic Media with Injuries*. NY – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore. 1981.
3. Dul'nev R.A., Kotov P.I. *Termicheskaya ustalost' metallov* [Thermal Fatigue of Metals]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1980. 200 p. (In Russian).
4. Kazantsev A.G. Issledovanie vzaimodeystviya malotsiklovoy ustalosti i polzuchesti pri neizotermicheskom nagruzhenii [Investigation of the interaction of low-cycle fatigue and creep under non-isothermal loading]. *Problemy prochnosti* [Strength of Materials]. 1985. No 5. P. 25–31 (In Russian).
5. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest' elementov konstruksiy* [Creep of Structural Elements]. Moscow. Nauka Publ. 1966. 752 p. (In Russian).
6. Gokhfel'd 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).
7. Degtyarev V.P. *Plastichnost' i polzuchest' mashinostroitel'nykh konstruksiy* [Plasticity and Creep of Engineering Structures]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1967. 130 p. (In Russian).
8. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied Theory of Plasticity and Creep]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1968. 400 p. (In Russian).
9. Lokoshchenko A.M. *Polzuchest' i dlitel'naya prochnost' metallov* [Creep and Long Durability of Metals]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2016. 504 p. (In Russian).
10. Boyle J.T., Spence J. *Stress Analysis for Creep*. New York, USA. 1980.
11. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G. *Prikladnaya teoriya vyzkoplastichnosti* [Applied Theory of Viscoplasticity]. Nizhni Novgorod. NNGU Publ. 2015. 318 p. (In Russian).
12. Bondar V.S. *Neuprugost'. Varianty teorii* [Inelasticity. Variants of the Theory]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2004. 144 p. (In Russian).
13. Perzyna P. *Osnovnye voprosy vyzkoplastichnosti* [Fundamental Problems in Viscoplasticity]. Moscow. Mir Publ. 1968. 176 p. (In Russian).
14. Shevchenko Yu.N., Terekhov R.G. *Fizicheskie uravneniya termovyzkoplastichnosti* [Physical Equations of Thermoviscoplasticity]. Kiev. Naukova dumka Publ. 1982. 240 p. (In Russian).
15. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Inter. J. of Plasticity*. 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302.
16. Malinin N.N., Khadjinsky G.M. Theory of creep with anisotropic hardening. *Inter. J. of Mechanical Science*. 1972. Vol. 14. P. 235–246.
17. Miller A. Matematicheskaya model' dlya monotonogo i tsiklicheskogo izmeneniya deformatsii i deformatsii polzuchesti, osnovannaya na analize neuprugoy deformatsii [Mathematical model for monotonic and cyclic changes of deformation and creep deformation based on inelastic deformation analysis]. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov* [Theoretical Foundations of Engineering Calculations]. ASME. 1976. No 2. P. 1–20 (In Russian).
18. Krieg R.D., Swearingen J.C., Rohde R.W. A physically-based internal variable model for rate-dependent plasticity, Inelastic behavior of pressure vessel and piping components (Ed. by Chang T.Y. and Krempl E.). ASME. 1978. PVP-PB-028. P. 15–28.
19. Okhasi, Ono, Kawai. Otsenka opredelyayushchikh uravneniy polzuchesti dlya nerzhavyeyushchey stali 304 pri povtoryayushchemsya mnogoosnom nagruzhenii [Evaluation of creep equations for determining the 304 stainless steel with repeated multiaxial loading]. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov* [Theoretical Foundations of Engineering Calculations]. ASME. 1982. Vol. 104. No 3. P. 1–8 (In Russian).

20. 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 konstruktsionnykh 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).

DEFINING RELATIONS OF TRANSIENT CREEP UNDER COMPLEX STRESS STATE

Volkov I.A.^{1,2}, Igumnov L.A.², Kazakov D.A.², Shishulin D.N.³, 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 problem of evaluating the strength and service life of operating properties of critical engineering facilities which are characterized by multivariable non-stationary thermomechanical effects, leading to degradation of initial strength properties of structural materials (metals and alloys) on the mechanisms of fatigue and creep is considered.

A mathematical model describing the processes of unsteady creep of metals under complex stress state is constructed. A theoretical-experimental method of determining the material parameters and scalar functions defining transient creep ratios is developed.

The results of numerical modeling of the creep process 304 at block thermocyclic complex modes of deformation are presented. The numerical results are compared with those of full-scale experiments. Particular attention is paid to issues of simulation of creep for complex deformation processes, accompanied by the rotation of the main sites of stress and strain tensors and creep strains.

Keywords: transient creep, long-term strength, damage, service life, mathematical modeling, basic experiment, material parameters, numerical and full-scale experiment.