Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. П. Радченко, Е. В. Небогина, Е. А. Андреева, Структурная модель разупрочняющегося при ползучести материала в условиях сложного напряженного состояния, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2009, выпуск 1(), 75–84

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu682>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.198.64.247

26 апреля 2023 г., 11:16:13

УДК 539.376

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ РАЗУПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ

В. П. Радченко, Е. В. Небогина, Е. А. Андреева

Самарский государственный технический университет,
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mails: radch@samgtu.ru, andrejeva@kg.ru

Исследован процесс разупрочнения и разрушения материала при ползучести в условиях сложного напряжённого состояния на основании структурной модели. Введен энергетический критерий разрушения локального элемента. Выполнен сравнительный анализ расчётных по структурной модели и экспериментальных данных по длительной прочности для тонкостенных трубчатых образцов из стали 12X18H10T при $T = 850^\circ\text{C}$ для следующих видов напряжённого состояния: растяжение, кручение и растяжение, внутреннее давление и растяжение. Результаты расчёта по структурной модели сопоставлены с аналогичными данными по существующим феноменологическим моделям ползучести и длительной прочности.

Ключевые слова: ползучесть, структурная модель, сложное напряжённое состояние, разупрочнение, разрушение, длительная прочность.

1. Математическая модель. Одним из важных направлений развития механики микронеоднородных сред является разработка структурных моделей, учитывающих микроразрушения и моделирующих тонкие эффекты неупругого деформирования разупрочняющихся материалов, описание которых с феноменологических позиций макросреды встречает наибольшие трудности [1–7]. В настоящей работе обобщаются результаты [6, 7], полученные для пластически разупрочняющегося материала, на случай разупрочнения и разрушения материала вследствие ползучести в условиях сложного напряжённого состояния.

В соответствии с [5–7] микронеоднородное состояние материала при ползучести в главных осях описывается структурной моделью среды, согласно которой поликристаллический материал моделируется системой хаотически ориентированных однородных стержней (локальных элементов) одинаковой длины, работающих на растяжение – сжатие. Каждый локальный элемент этой системы наделяется простейшими деформационными свойствами: линейной упругостью, идеальной пластичностью и нелинейной вязкостью. Поэтому деформацию i -того локального элемента можно представить в виде

$$\varepsilon_i = e_i + e_i^p + p_i, \quad (1)$$

где $e_i = \frac{\sigma_i}{E_m}$ — упругая деформация; e_i — пластическая деформация; $p_i =$

Радченко Владимир Павлович — заведующий кафедрой прикладной математики и информатики; д.ф.-м.н., профессор.

Небогина Елена Васильевна — доцент кафедры прикладной математики и информатики; к.ф.-м.н., доцент.

Андреева Елена Анатольевна — аспирант кафедры прикладной математики и информатики.

$= a |\sigma_i|^{n-1} \sigma_i$ — деформация ползучести; a , n — микроконстанты; E_m — микромодуль упругости.

Ориентация локальных элементов задается двумя сферическими углами $\theta (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2})$ и $\varphi (0 \leq \varphi \leq 2\pi)$. Связь между макро- и микрохарактеристиками напряжённого состояния в главных осях задается уравнениями совместности деформаций [5]

$$\varepsilon(\theta, \varphi) = \langle \varepsilon_x \rangle \cos^2 \theta + \langle \varepsilon_y \rangle \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + \langle \varepsilon_z \rangle \sin^2 \theta \sin^2 \varphi, \quad (2)$$

и уравнениями равновесия

$$\begin{aligned} \langle \sigma_x \rangle &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} \sigma(\theta, \varphi) d\varphi, \\ \langle \sigma_y \rangle &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin^3 \theta d\theta \int_0^{2\pi} \sigma(\theta, \varphi) \cos^2 \varphi d\varphi, \\ \langle \sigma_z \rangle &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin^3 \theta d\theta \int_0^{2\pi} \sigma(\theta, \varphi) \sin^2 \varphi d\varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\langle \varepsilon_x \rangle$, $\langle \varepsilon_y \rangle$, $\langle \varepsilon_z \rangle$ — главные значения макродеформаций, $\langle \sigma_x \rangle$, $\langle \sigma_y \rangle$, $\langle \sigma_z \rangle$ — главные значения макронапряжений; $\varepsilon(\theta, \varphi)$ и $\sigma(\theta, \varphi)$ — соответственно микродеформации и микронапряжения в локальных элементах. Кроме этого, вводится гипотеза однородности деформации по объёму макрообразца, что равносильно принятию условия равенства деформации каждого локально элемента системы макросреды в этом же направлении. Математическая формулировка гипотезы имеет вид

$$\langle \varepsilon_x \rangle = \varepsilon(0, 0), \quad \langle \varepsilon_y \rangle = \varepsilon\left(\frac{\pi}{2}, 0\right), \quad \langle \varepsilon_z \rangle = \varepsilon\left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right). \quad (4)$$

В [5] изложена методика идентификации микропараметров E_m , a , n . В частности, $E_m = 3\langle E \rangle$, где E — макромодуль Юнга. Необходимой информацией для определения параметров a и n являются участки установившейся ползучести при одноосном растяжении ($\langle \sigma_x \rangle \neq 0$, $\langle \sigma_y \rangle = \langle \sigma_z \rangle = 0$), аппроксимация которых принимается в виде

$$\dot{\langle \varepsilon_x \rangle} = A(\langle \sigma_x \rangle)^N,$$

при этом в [5] установлено, что $n = N$,

$$a = A \left[2 \int_0^{\pi/2} C |C|^{\frac{1}{n}-1} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta \right],$$

где

$$C = \cos^2 \theta - \left[\frac{|\sigma'(\frac{\pi}{2})|}{\sigma'(0)} \right]^n \cos^2 \theta,$$

а $\sigma'(0) = \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma(\theta)$ — предельные (соответствующее стадии установившейся ползучести) значения микронапряжений.

В дальнейшем рассматривается процесс деформирования и разрушения в условиях ползучести, поэтому в (1) полагается $e^p = 0$.

Для описания процесса разрушения в материале необходимо ввести критерий разрушения локального элемента структурной модели. В настоящей работе вводится гипотеза вязкого разрушения, базирующаяся на энергетическом подходе накопления повреждённости в локальном элементе. В качестве меры повреждённости используется величина

$$\Omega(\theta, \varphi, t) = \frac{A_2(\theta, \varphi, t)}{A_2^*}, \quad (5)$$

где $A_2(\theta, \varphi, t) = \int_0^t \sigma(\theta, \varphi, \xi) \dot{p}(\theta, \varphi, \xi) d\xi$ — текущая величина работы микрона-

пряжений на микродеформации ползучести; A_2^* — микроконстанта материала (критическая величина работы микронапряжений в локальном элементе на микродеформации ползучести). Величины углов θ ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) и φ ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$) играют роль параметров, при этом предполагается, что если $\Omega(\theta, \varphi, t) < 1$, то локальный элемент находится в неразрушенном состоянии. Время разрушения $t = t_*$ элемента определяется из условия $\Omega(\theta, \varphi, t_*) = 1$. Разрушение элемента объёма материала происходит в результате разрушения всех локальных элементов.

Предложенный критерий позволяет естественным образом достоверно отразить сложный процесс накопления повреждений материала, не накладывая дополнительных гипотез на законы накопления повреждённости в локальном элементе. Очевидно, что данная модель предпочтительнее моделей, где в качестве разрушения объёма материала выступает разрушения хотя бы одного локального элемента (гипотеза слабого звена).

Для определения константы A_2^* необходимо иметь серию кривых стационарной одноосной ползучести с начальным участком третьей стадии при нескольких значениях $\langle \sigma_x \rangle = \text{const}$ в упругой области работы материала. На этих кривых определяются точки (p_*, t_*) , соответствующие границе между второй и третьей стадиями ползучести. И именно с этого момента времени начинается последовательное разрушение локальных элементов структурной модели, что и является причиной появления третьей стадии на кривой ползучести, при этом первым выйдет из строя наиболее нагруженный элемент при $\theta = 0$. Поэтому величина A_2 , накопленная в этом элементе к моменту времени $t = t_*$, соответствующему началу третьей стадии ползучести, и принимается за критическую величину A_2^* .

2. Алгоритм расчёта. Пусть задан тензор главных напряжений $\langle \sigma_x \rangle, \langle \sigma_y \rangle, \langle \sigma_z \rangle$ такой, что пластических деформаций не возникает. Тогда в начальный момент времени ($t = 0$) возникают только упругие деформации, поэтому

$$\varepsilon(\theta, \varphi) = \frac{\sigma(\theta, \varphi)}{E_m}. \quad (6)$$

Тогда из (2)–(6) получаем поле упругих напряжений

$$\sigma(\theta, \varphi) = 3\langle\sigma_x\rangle \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{4} \sin^2 \theta \right) + \frac{3}{4}\langle\sigma_y\rangle (5 \cos^2 \varphi \sin^2 \theta - 1) + \frac{3}{4}\langle\sigma_z\rangle (5 \sin^2 \varphi \sin^2 \theta - 1). \quad (7)$$

Расчёт деформации ползучести производится известным методом — шагами по времени. Осуществляется дискретизация по временной координате $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ ($i = 0, 1, 2, \dots$), вычисляется приращение деформации ползучести на интервале $[t_i, t_{i+1}]$ по формуле $\Delta p(\theta, \varphi, t_i) = a|\sigma(\theta, \varphi, t_i)|^{n-1}\sigma(\theta, \varphi, t_i)\Delta t$, а затем — деформация ползучести к моменту времени $t = t_{i+1}$:

$$p(\theta, \varphi, t_{i+1}) = p(\theta, \varphi, t_i) + \Delta p(\theta, \varphi, t_i).$$

Тогда для полной деформации имеем

$$\varepsilon(\theta, \varphi, t_{i+1}) = \frac{\sigma(\theta, \varphi, t_{i+1})}{E_m} + p(\theta, \varphi, t_{i+1}). \quad (8)$$

С помощью уравнений равновесия, совместности деформаций и (8) получаем соотношения для макродеформаций $\langle\varepsilon_x\rangle$, $\langle\varepsilon_y\rangle$, $\langle\varepsilon_z\rangle$ для любого момента времени $t = t_{i+1}$:

$$\begin{aligned} \langle\varepsilon_x(t_{i+1})\rangle = & \frac{3}{4E_m} \left(4\langle\sigma_x(t_{i+1})\rangle - \langle\sigma_y(t_{i+1})\rangle - \langle\sigma_z(t_{i+1})\rangle + \right. \\ & + \frac{8E_m}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi p(\theta, \varphi, t_{i+1}) \cos^2 \theta \sin \theta d\theta d\varphi - \\ & - \frac{2E_m}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi p(\theta, \varphi, t_{i+1}) \sin^3 \theta \cos^2 \varphi d\theta d\varphi - \\ & \left. - \frac{2E_m}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi p(\theta, \varphi, t_{i+1}) \sin^3 \theta \sin^2 \varphi d\theta d\varphi \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \langle \varepsilon_y(t_{i+1}) \rangle = & \frac{3}{4E_m} \left(-\langle \sigma_x(t_{i+1}) \rangle + 4\langle \sigma_y(t_{i+1}) \rangle - \langle \sigma_z(t_{i+1}) \rangle - \right. \\
 & - \frac{2E_m}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi p(\theta, \varphi, t_{i+1}) \cos^2 \theta \sin \theta d\theta d\varphi + \\
 & + \frac{8E_m}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi p(\theta, \varphi, t_{i+1}) \sin^3 \theta \cos^2 \varphi d\theta d\varphi - \\
 & \left. - \frac{2E_m}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi p(\theta, \varphi, t_{i+1}) \sin^3 \theta \sin^2 \varphi d\theta d\varphi \right), \\
 \langle \varepsilon_z(t_{i+1}) \rangle = & \frac{3}{4E_m} \left(-\langle \sigma_x(t_{i+1}) \rangle - \langle \sigma_y(t_{i+1}) \rangle + 4\langle \sigma_z(t_{i+1}) \rangle - \right. \\
 & - \frac{2E_m}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi p(\theta, \varphi, t_{i+1}) \cos^2 \theta \sin \theta d\theta d\varphi - \\
 & - \frac{2E_m}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi p(\theta, \varphi, t_{i+1}) \sin^3 \theta \cos^2 \varphi d\theta d\varphi + \\
 & \left. + \frac{8E_m}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi p(\theta, \varphi, t_{i+1}) \sin^3 \theta \sin^2 \varphi d\theta d\varphi \right). \quad (9)
 \end{aligned}$$

Используя найденные значения макродеформаций и распределение деформации ползучести $p(\theta, \varphi, t_{i+1})$, находим распределение микронапряжений в данный момент времени $t = t_{i+1}$ из соотношения

$$\begin{aligned}
 \sigma_i(\theta, \varphi, t_{i+1}) = E_m \Big(& \langle \varepsilon_x(t_{i+1}) \rangle \cos^2 \theta + \langle \varepsilon_y(t_{i+1}) \rangle \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + \\
 & + \langle \varepsilon_z(t_{i+1}) \rangle \sin^2 \theta \sin^2 \varphi - p_i(\theta, \varphi, t_{i+1}) \Big), \quad (10)
 \end{aligned}$$

вычисляем текущую величину работы микронапряжений на микродеформации ползучести по формуле $A_2(\theta, \varphi, t_{i+1}) = \int_0^{t_{i+1}} \sigma(\theta, \varphi, \xi) \dot{p}(\theta, \varphi, \xi) d\xi$, находим меру повреждённости локального элемента (5) и проверяем критерий разрушения.

Расчёт на основании соотношений (9), (10) осуществляется до тех пор, пока ни один локальный элемент структурной модели не разрушен, при этом выполняется дискретизация области по переменным θ и φ , а двойные интегралы вычисляются численно. Если же присутствует процесс последовательного

разрушения локальных элементов, то из области интегрирования удаляются области разрушенных элементов.

3. Результаты расчёта и сравнительный анализ. С целью экспериментальной проверки разработанной методики были использованы опытные данные по ползучести и длительной прочности тонкостенных образцов из стали 12X18H10T при $T = 850^\circ\text{C}$, приведенные в [8, 9], где представлены экспериментальные данные по длительной прочности для 69 образцов двух плавок при трех видах напряжённого состояния: одноосного растяжения (образцы с 1 по 29), растяжения и кручения (образцы № 30–53), внутреннего давления и растяжения (образцы № 54–69). В таблице через t_* обозначены экспериментальные значения времени до разрушения [9, 10], а через $M[t_*]$ их осредненные значения для каждого режима нагружения.

Исходной информацией для идентификации параметров структурной модели являлись осреднённые кривые стационарной одноосной ползучести испытаний 21 образца при четырех уровнях напряжений: $\sigma = 39,24; 49,05; 58,86; 78,48$ МПа [10], которые приведены на рисунке сплошными линиями. Параметры апроксимации скорости установившейся ползучести имеют значения: $N = 3,2$; $A = 6,65 \cdot 10^{-9} (\text{МПа})^{-3,2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Макромодуль Юнга $\langle E \rangle = 77750$ МПа. С использованием этих значений макропараметров были определены микропараметры структурной модели: $E_m = 232500$ МПа; $n = 3,2$; $a = 6,6858 \cdot 10^{-10} (\text{МПа})^{-3,2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Согласно вышеприведенной методике, по точкам начала третьей стадии определялась для каждой реализации величина A_2^* и затем эти четыре значения осреднялись. В результате получено, что $A_2^* = 4,155 \frac{\text{МН} \cdot \text{м}}{\text{м}^3}$.

На рисунке сплошными линиями приведены экспериментальные данные, а штриховыми линиями представлены расчётные по структурной модели кривые одноосной ползучести.

Расчёт длительной прочности по структурной модели осуществляется в главных напряжениях σ_1 и σ_2 , значения которых приведены в [8, 9] и пред-

Экспериментальные (сплошные) и расчётные (штриховые) линии диаграмм материала 12X18H10T при $T = 850^\circ\text{C}$ в условиях одноосного напряжённого состояния: 1 — $\sigma = 39,24$ МПа, 2 — $\sigma = 49,05$ МПа, 3 — $\sigma = 58,86$ МПа, 4 — $\sigma = 78,48$ МПа

ставлены в таблице. При использовании структурной модели в рассматриваемом случае полагалось $\langle \sigma_x \rangle = \sigma_1$, $\langle \sigma_y \rangle = \sigma_2$, $\langle \sigma_z \rangle = 0$. Расчётным значениям времени до разрушения на основании структурной модели в таблице соответствует переменная t_3 .

Для анализа и сопоставления результатов было выполнено сравнение данных расчёта длительной прочности по предложенной структурной модели с данными расчёта для этой же стали по прямым феноменологическим теориям длительной прочности, базирующихся на концепции эквивалентных напряжений [11, 12].

В качестве эквивалентных напряжений в работах [11, 12] использовались: максимальное главное напряжение $\sigma_{\varepsilon 1} = \sigma_{\max}$; интенсивность напряжения $\sigma_{\varepsilon 2} = \sigma_e$; Критерий В. П. Сдобырева $\sigma_{\varepsilon 3} = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_e)$; разность максимального и минимального главных напряжений — $\sigma_{\varepsilon 4} = \sigma_1 - \sigma_2$; критерий А. А. Лебедева $\sigma_{\varepsilon 5} = \chi \sigma_e + (1 - \chi) \sigma_{\max}$, где χ — константа материала ($\chi \in [0, 1]$).

Выполнение в [8, 9, 11, 12] исследования для стали 12X18H10T показали, что из двух аппроксимаций диаграммы длительной прочности

$$t_2 = C_3 \sigma_{\varepsilon}^{-m_3}, \quad (11)$$

$$t_2 = C_4 \exp(-m_4 \sigma_{\varepsilon}), \quad (12)$$

где t_2 — расчётное время до разрушения; C_3, C_4, m_3, m_4 — константы; лучшие результаты при одинаковых σ_{ε} даёт (11), а минимальная погрешность по (11) достигается при $\sigma_{\varepsilon} = \sigma_{\max}$ со значениями коэффициентов аппроксимации $m = 3,58$; $C_3 = 7,97 \cdot 10^{10} (\text{МПа})^{-m_3} \cdot \text{ч}$.

В таблице значения t_2 соответствует времени до разрушения, рассчитанному по модели (11) при $\sigma_{\varepsilon} = \sigma_{\max}$ (σ_1 и σ_2 — главные напряжения).

Кроме этого, в [5] выполнен расчёт длительной прочности для этой стали на основании феноменологической модели энергетического типа. Время разрушения t_1 по этой модели также приведено в таблице.

Для сравнения результатов расчёта времени до разрушения по реологической модели энергетического типа (t_1), по концепции эквивалентных напряжённых состояний (t_2), по структурной модели (t_3) с экспериментальными данными (t_*) были вычислены относительные значения абсолютных ошибок отклонений расчётных данных от экспериментальных значений по формулам

$$\Delta_1 = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{t_{*i} - t_{1i}}{t_{1i}} \right|, \quad \Delta_2 = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{t_{*i} - t_{2i}}{t_{2i}} \right|, \quad \Delta_3 = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{t_{*i} - t_{3i}}{t_{3i}} \right|, \quad (13)$$

где i — номер реализации при заданном напряжённом состоянии; t_{1i}, t_{2i}, t_{3i} — расчётные значения времени разрушения по реологической модели энергетического типа, по эквивалентным напряжениям и по структурной модели соответственно; t_{*i} — экспериментальное значение времени разрушения.

В результате расчётов получено: $\Delta_1 = 35,87\%$, $\Delta_2 = 38,45\%$, $\Delta_3 = 38,63\%$.

4. Обсуждение результатов. Анализ результатов погрешности с точки зрения статистической значимости свидетельствует о том, что все представленные расчётные модели одного порядка точности. Однако следует отметить, что если модель (11) есть не что иное, как аппроксимация всех экспериментальных данных по длительной прочности при всех видах напряжённого состояния ($n = 69$), то исходной информацией для структурной модели являются лишь данные по одноосной ползучести ($n = 21$), а для остальных режимов

Экспериментальные (t_*), расчётные по реологической модели энергетического типа (t_1), по эквивалентным напряжениям (t_2), расчётные по структурной модели (t_3) значения длительной прочности стали 12Х18Н10Т при $T = 850^\circ\text{C}$

№ образца	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	t_* , ч	$M[t_*]$, ч	t_1 , ч	t_2 , ч	t_3 , ч
Одноосное растяжение							
1–10	39,24	0	68; 67; 67; 66; 50; 47; 43; 40; 35; 30,5	51,3	51,5	40,8	55,12
11–21	49,05	0	30; 28; 24; 23; 22,5; 21,5; 20,5; 18; 16; 12	21,8	26,6	18,34	22,54
22–27	58,86	0	20,5; 20; 16; 15; 14; 6,7	15,4	15,1	9,54	10,72
28–29	78,48	0	6; 6	6	5,9	3,4	3,15
Растяжение + кручение							
30–32	32,96	–3,53	77; 65; 43	61,8	72,3	76,16	124,39
33	34,82	–5,4	70	70	57,3	62,5	94,17
34	39,24	–19,62	50	50	22,34	40,8	38,1
35–37	39,73	–0,49	25; 24,5; 23	24,2	48,7	36,7	60,08
38–41	40,42	–1,18	30,5; 30; 27; 20	26,9	45,2	39,01	55,13
42	49,05	–19,62	24	24	13,3	18,34	16,51
43–44	51,8	–2,75	14,5; 11,5	13	20,7	15,08	18,77
45	55,13	–1,18	15	15	17,94	12,06	14,76
46–51	59,35	–0,49	15; 11; 10; 9; 6; 5	9,3	14,5	9,26	10,89
52–53	64,84	–1,08	5; 4	4,5	10,8	6,75	7,43
Внутреннее давление + растяжение							
58–59	49,05	19,62	17; 12,5	14,75	40	18,34	29,05
60–61	49,05	39,24	33,5; 20,5	27	34,6	18,34	31,72
62	49,05	49,05	8,3	8,3	26,6	18,34	34,23
63–64	54,94	27,47	10; 5,2	7,6	29,2	12,23	18,23
65–66	58,86	19,62	16; 10,6	13,3	22,4	9,54	13,24
67	58,86	39,24	27	27	22,3	9,54	14,08
68	58,86	58,86	5,1	5,1	15,2	9,54	15,86
69	62,78	53,95	7,6	7,6	15,2	7,57	11,37

нагружения при сложном напряжённом состоянии осуществляется прогноз длительной прочности по структурной модели и критерию разрушения (5).

Еще одним недостатком моделей типа (11), базирующихся на эквивалентных напряжениях, являются трудности, связанные с оценкой длительной прочности при нестационарных режимах изменения нагружения при одном виде напряжённого состояния и особенно при смене вида напряжённого состояния. В таких случаях приходится применять различные варианты линейного (или нелинейного) суммирования повреждений по парциальным (относительным) значениям времени до разрушения, парциальным значениям неупругой деформации в момент разрушения или их различным комбинациям. При использовании же структурной модели эта проблема решается естественным образом, при этом, кроме времени до разрушения, фиксируется эволюция как макро-, так и микронапряжённо-деформированного состояния.

В заключение необходимо отметить, что столь большой разброс по длительной прочности по всем трем теориям связан, по-видимому, с тем, что экспериментальные данные получены для образцов из двух плавок, а как известно [13, 14] деформация ползучести остро чувствительна к вариациям металлофизических характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-01-00478-а).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новожиллов В. В., Кадашев Ю. И. Микронапряжения в конструкционных материалах. — Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-е), 1990. — 223 с.
2. Кадашев Ю. И., Пейсахов А. Н., Помыткин С. П. Расширенный вариант теории неупругости, учитывающий микроразрушения // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2008. — № 1(16). — С. 33–35.
3. Гохфельд Д. А., Садаков О. С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторном нагружении. — М.: Машиностроение, 1984. — 256 с.
4. Стружанов В. В., Башуров Вяч. В. Модификационная модель Мазинга // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2007. — № 1(14). — С. 29–39.
5. Радченко В. П., Ерёмин Ю. А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 264 с.
6. Радченко В. П., Небогина Е. В., Басов М. В. Структурная модель закритического упругопластического деформирования материалов в условиях одноосного растяжения // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2000. — № 9. — С. 55–65.
7. Андреева Е. А. Решение одномерных задач пластичности для разупрочняющегося материала // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2008. — № 2(17). — С. 152–160.
8. Закономерности ползучести и длительной прочности: Справочник / Под ред. С. А. Шестерикова. — М.: Машиностроение, 1983. — 101 с.
9. Локощенко А. М., Мякотин Е. А., Шестериков С. А. Ползучесть и длительная прочность стали 12Х18Н10Т в условиях сложного напряжённого состояния // *Изв. АН СССР. МТТ.*, 1979. — № 4. — С. 87–94.
10. Локощенко А. М., Шестериков С. А. Метод описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении // *ПМТФ*, 1980. — № 3. — С. 155–159.
11. Локощенко А. М., Шестериков С. А. Стандартизация критериев длительной прочности / В сб.: *Унифицированные методы определения ползучести и длительной прочности*. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — С. 3–15.
12. Локощенко А. М. Длительная прочность металлов при сложном напряжённом состоянии // *Проблемы прочности*, 1983. — № 8. — С. 55–59.
13. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966. — 752 с.
14. Розенберг В. Н. Основы жаропрочности металлических материалов. — М.: Металлургия, 1973. — 328 с.

Поступила в редакцию 10/ХП/2008;
в окончательном варианте — 02/П/2009.

MSC: 74C05, 74K10

STRUCTURAL MODEL OF MATERIAL SOFTENING AT CREEP UNDER COMPLEX STRESS CONDITIONS

V. P. Radchenko, E. V. Nebogina, E. A. Andreeva

Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100.

E-mails: radch@samgtu.ru, andrejeva@kg.ru

The process of softening and destructions of material is investigated at creep under complex tense state conditions on the basis of a structural model. Energy criterion of local element destruction is presented. Comparative analysis is performed of structural model calculation data and experimental data on the protracted durability for thin-shelled tubular steel standards 12X18H10T at $T = 850^{\circ}\text{C}$ for the followings types of tense state: tension, twisting and tension, intrinsic pressure and tension. Calculation results are compared with analogical data of the existing phenomenological creep and protracted durability models.

Key words: *creep, structural model, combined stress conditions, material softening, material destruction, stress-rupture strength.*

Original article submitted 10/XII/2008;
revision submitted 02/III/2009.

Radchenko Vladimir Pavlovich, Dr. Sci. (Phys. & Math.), Prof., Head of Dept. of Applied Mathematics and Computer Science.

Nebogina Elena Vasilyevna, Ph. D. (Phys. & Math.), Ass. Prof., Dept. of Applied Mathematics and Computer Science.

Andreeva Elena Anatolevna, Postgraduate Student, Dept. of Applied Mathematics and Computer Science.