

УДК 539.376

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

© 2020 г. Ю. Г. Басалов^a, А. М. Локощенко^{a,*}, В. В. Терауд^a

^a Научно-исследовательский институт механики
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: loko@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 03.10.2019 г.

После доработки 08.10.2019 г.

Принята к публикации 24.10.2019 г.

Приведены результаты испытаний стержней из трех сплавов на ползучесть и длительную прочность при нормальных или касательных напряжениях, однократно или многократно меняющихся во времени. В качестве основы при моделировании полученных данных использована кинетическая теория Ю.Н. Работнова. В результате получено хорошее соответствие теоретических характеристик ползучести и длительной прочности экспериментальным значениям.

Ключевые слова: ползучесть, длительная прочность, моделирование, переменные напряжения, растяжение, кручение, поврежденность

DOI: 10.31857/S0572329920040029

1. Введение. Систематические высокотемпературные испытания металлов на ползучесть проводятся с начала прошлого века. В этих испытаниях проявляются различные особенности механических характеристик, зависящие от марки металла или сплава, уровней напряжений и температуры, структуры, программы нагружения и т.д. Поэтому исследование ползучести различных металлов и сплавов к настоящему времени не потеряло своей актуальности. Основной интерес представляет определение характеристик ползучести при переменных растягивающих или касательных напряжениях.

2. Постановка задачи. В данной статье приведено описание трех серий экспериментальных исследований процессов ползучести стержней, которые характеризуются однократным или многократным внезапным изменением значений нормального или касательного напряжения. Анализ теоретических моделей показал, что наиболее перспективной при описании результатов таких испытаний является кинетическая теория ползучести, разработанная Ю.Н. Работновым [1]. Моделирование приведенных экспериментальных результатов во всех сериях проводится с помощью этой кинетической теории.

3. Описание результатов испытаний никелевого сплава ХН55МВЦ. В [2] приведены результаты испытаний никелевого сплава ХН55МВЦ (ЧС57) при растяжении в условиях циклического приложения кусочно-постоянного напряжения и разгрузки при температуре 900°C. Выбор для исследования данного структурно стабильного сплава объясняется тем обстоятельством, что период формирования равновесной структуры в нем на порядок меньше, чем его долговечность. На рис. 1 приведены кривые ползучести, полученные либо в случае стационарного нагружения при $\sigma_0 = 20$ МПа (кривая 1), либо в случае циклического нагружения, осуществляющегося в следующей после-

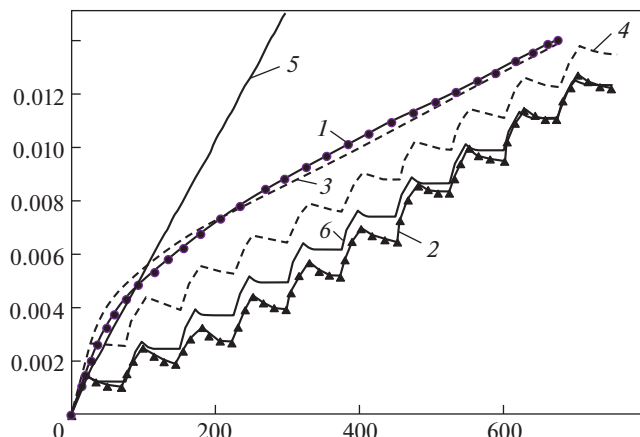


Рис. 1

довательности: мгновенно приложенное напряжение $\sigma_0 = 20$ МПа, действующее в течение $t_1 = 25$ час, затем мгновенная полная разгрузка ($\sigma = 0$) и последующий отдых ($\sigma = 0$) в течение $t_2 = 50$ час (кривая 2). Испытания как при постоянном напряжении, так и в течение 10 последовательных циклов нестационарного нагружения проводились на цилиндрических образцах диаметром 7 мм и длиной рабочей части 70 мм. Эксперименты показали, что в процессе отдыха наблюдается обратная ползучесть. Кривые ползучести как при $\sigma_0 = 20$ МПа, так и при $\sigma = 0$ практически не зависят от номера цикла, т.е. фактически повторяют соответствующие кривые первого цикла.

В [3] проведено моделирование полученных результатов. При этом использован упрощенный вариант предложенной в [4] системы реологических соотношений. В [3] моделирование результатов испытаний [2] проводится с помощью следующей системы двух дифференциальных уравнений:

$$\dot{p} = G \text{sign}[(\sigma - \chi)^n], \quad \dot{\chi} = A(\sigma) \dot{p} - D(\text{sign} \chi) \chi^n, \quad A(\sigma) = C \sigma^{-m}$$

в которых p — деформация ползучести, χ — микронапряжение, G, n, D, C, m — материальные константы, точка означает дифференцирование по времени t . В [3] предложен метод вычисления пяти приведенных материальных констант. Применение этого метода основано на использовании результатов испытаний при двух постоянных уровнях положительного осевого напряжения $\sigma_0 = 20$ и 14 МПа, однако в [3] приведены экспериментальные данные только при $\sigma_0 = 20$ МПа. На рис. 1 в качестве примера моделирования экспериментальных результатов приведены расчетные кривые ползучести при стационарном и нестационарном нагружении (кривые 3 и 4 соответственно) при учете либо изотропного, либо анизотропного упрочнения. Однако в тексте статьи [3] учет анизотропного упрочнения не проводится, значения используемых материальных констант G, n, D, C, m также не приводятся.

Авторы данной статьи для описания ползучести сплава ХН55МВЦ в рассматриваемых условиях используют вариант кинетической теории [5]. В этом варианте учитываются неустановившаяся стадия ползучести и явление последействия.

Рассмотрим систему определяющего и кинетического уравнений с тремя материальными константами в виде

$$\dot{p} = A(\sigma - q), \quad p(t = 0) = 0 \quad (3.1)$$

$$\dot{q} = B\sigma - Cq, \quad q(t = 0) = 0 \quad (3.2)$$

здесь и далее $q(t)$ — кинетический параметр. Система дифференциальных уравнений (3.1), (3.2) при $\sigma = \sigma_0$ приводит к следующим зависимостям $q(t)$ и $p(t)$:

$$q(t) = \frac{B}{C}\sigma_0[1 - \exp(-Ct)], \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (3.3)$$

$$\dot{p}(t) = A\sigma_0\left[1 - \frac{B}{C}(1 - \exp(-Ct))\right], \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (3.4)$$

Интегрирование (3.4) приводит к следующей зависимости $p(t)$:

$$p(t) = \frac{A}{B}\sigma_0 \cdot \int_0^t \left[1 - \frac{B}{C}(1 - \exp(-Ct))\right] dt, \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (3.5)$$

Зависимости (3.3) и (3.5) при постоянном растягивающем напряжении $\sigma(t) = \sigma_0$ описывают постепенное увеличение параметра $q(t)$ во времени от $q(0) = 0$ до $\lim_{t \rightarrow +\infty} q(t) = \frac{B}{C}\sigma_0$ и постепенное увеличение деформации ползучести во времени в соответствии с уравнением (3.5).

Непосредственно перед разгрузкой ($t = t_1 = 25$ час) $q(t)$ и $p(t)$ принимают следующие значения:

$$q(t_1) = q_1 = \frac{B}{C}\sigma_0[1 - \exp(-Ct_1)], \quad p_1 = p(t_1) \quad (3.6)$$

При разгрузке ($t > t_1 = 25$ час) из (3.2), (3.6) следует:

$$\begin{aligned} q(t_1) &= q_1, \quad \frac{dq}{dt} = -Cq, \quad \frac{dq}{q} = -Cdt, \quad \ln \frac{q}{q_1} = -C(t - t_1) \\ q(t) &= q_1 \exp[-C(t - t_1)], \quad t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2) = 75 \text{ [час]} \end{aligned} \quad (3.7)$$

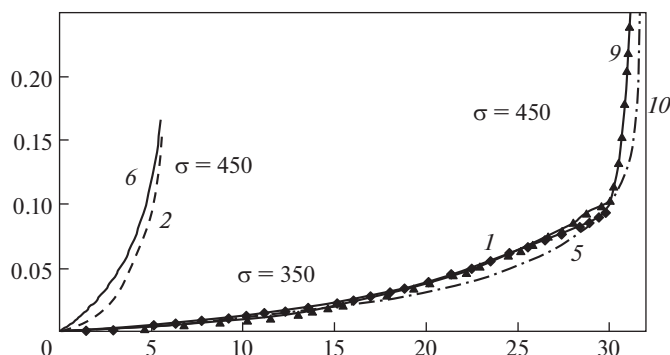
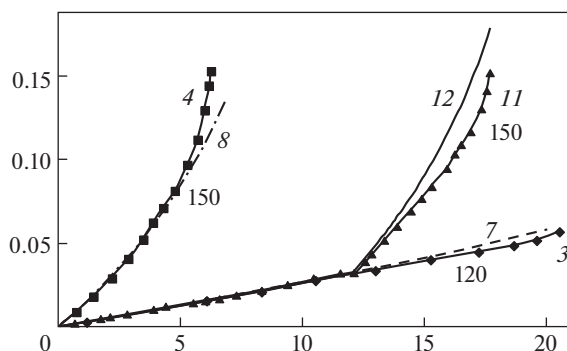
Подставляя (3.7) в (3.1) при $\sigma = 0$, получаем

$$\dot{p} = -Aq = -Aq_1 \{\exp[-C(t - t_1)]\}$$

Отсюда уравнение кривой ползучести при разгрузке принимает такой вид:

$$\begin{aligned} p(t) &= p_1 - Aq_1 \int_{t_1}^t \{\exp[-C(t - t_1)]\} dt, \quad t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2) \\ p_2 &= p(t_2 = 75 \text{ час}) = p_1 - Aq_1 \int_{t_1}^{t_2} \{\exp[-C(t - t_1)]\} dt \end{aligned} \quad (3.8)$$

На рис. 1 наряду с экспериментальной кривой при постоянном нагружении (кривая 1) приведена теоретическая кривая 5, соответствующая уравнению (3.5). Экспериментальной кривой ползучести при циклическом нагружении (кривая 2) соответствует теоретическая кривая 6, построенная согласно уравнениям (3.5), (3.8). Все теоретические кривые получены при $A = 7.2 \times 10^{-6}$ (МПа · час) $^{-1}$, $B = 0.178$ (час) $^{-1}$, $C = 0.271$ (час) $^{-1}$.

Рис. 2. Ползучесть сплава ВЖ-159 при $T = 750^\circ\text{C}$ Рис. 3. Ползучесть сплава ВЖ-159 при $T = 850^\circ\text{C}$

4. Описание результатов испытаний жаропрочного сплава ВЖ-159. В [6] приведены результаты экспериментального исследования процесса высокотемпературной ползучести жаропрочного сплава ВЖ-159, которые были получены в НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Опыты были выполнены на цилиндрических образцах с длиной рабочей части $l = 50$ мм и диаметром $d = 8$ мм в условиях одноосного растяжения для различных уровней нормального напряжения σ и температуры T . Результаты этих испытаний при $T = 750^\circ\text{C}$ приведены на рис. 2 в виде кривых ползучести 1 и 2 при постоянных напряжениях $\sigma = 350$ МПа и $\sigma = 450$ МПа соответственно. Аналогично результаты испытаний при $T = 850^\circ\text{C}$ приведены на рис. 3 в виде кривых ползучести 3 и 4 при постоянных напряжениях $\sigma = 120$ МПа и $\sigma = 150$ МПа соответственно.

Описание этих результатов приведено в [6] с помощью варианта теории Ю.Г. Коротких [7]. При описании экспериментальных данных в [6] применяются системы уравнений с использованием 11 материальных констант.

Авторы данной статьи для описания экспериментальных данных, приведенных на рис. 2 и 3, использовали вариант кинетической теории Ю.Н. Работнова [1]:

$$\dot{p} = B \left[\frac{\sigma(1+p)}{1-\omega} \right]^n, \quad p(t=0) = 0 \quad (4.1)$$

$$\dot{\omega} = C \left[\frac{\sigma(1+p)}{1-\omega} \right]^m, \quad \omega(t=0) = 0 \quad (4.2)$$

Кинетический параметр ω характеризует поврежденность материала, накапливаемую в процессе ползучести. Теоретические кривые ползучести, определенные с помощью уравнений (4.1), (4.2) при использовании значений материальных констант $n = 9.782$, $m = 4.542$, $B = 3.065 \times 10^{-3} \text{ (МПа)}^{-n} \text{ час}^{-1}$, $C = 6.760 \times 10^3 \text{ (МПа)}^{-n} \text{ час}^{-1}$, позволяет хорошо описывать результаты испытаний при постоянных напряжениях, они приведены на рис. 2 (кривые 5 и 6) и 3 (кривые 7 и 8).

При $T = 750^\circ\text{C}$ в случае скачкообразного увеличения напряжения с $\sigma = 350 \text{ МПа}$ до $\sigma = 450 \text{ МПа}$ экспериментальные данные представлены на рис. 2 кривой 9. При $T = 850^\circ\text{C}$ в случае скачкообразного увеличения напряжения с $\sigma = 120 \text{ МПа}$ до $\sigma = 150 \text{ МПа}$ экспериментальные данные представлены кривой 11. В случае ступенчатого увеличения растягивающего напряжения при $T = 850^\circ\text{C}$ система уравнений (4.1)–(4.1) хорошо описывает экспериментальные данные (теоретическая кривая 12). При $T = 750^\circ\text{C}$, однако, к моменту скачкообразного увеличения напряжения ($t_1 = 30 \text{ мин}$) уровень поврежденности ω достиг достаточно большого значения, в связи с этим сразу после догрузки кривая ползучести стала почти вертикальной. Для исправления этого результата, т.е. для уменьшения скорости ползучести при $t > t_1$, следует заменить уравнение ползучести (4.1) на

$$\dot{\sigma} = B \left[\frac{\sigma(1+p)}{1-\omega} \right]^n \cdot \exp q \quad (4.3)$$

где q — второй (кроме ω) структурный параметр, удовлетворяющий кинетическому уравнению

$$dq = cpd\sigma, \quad c = -9.6 \quad (4.4)$$

Теоретическая кривая ползучести при $T = 750^\circ\text{C}$ после внезапного увеличения напряжения (кривая 10), соответствующая уравнениям (4.3), (4.4) хорошо соответствуют экспериментальной кривой 9.

5. Описание ползучести при прямом и обратном кручении. Подавляющее большинство экспериментальных исследований процесса ползучести проводится при растягивающих напряжениях, при этом осевое напряжение, естественно, не меняет знак. В отличие от таких испытаний в [8] приведены экспериментальные данные по ползучести тонкостенных трубчатых образцов при кручении, при этом касательное напряжение в процессе испытания меняет знак. В качестве материала для исследования был выбран дюралюмин Д16Т в состоянии поставки, материал был поставлен в виде прутка. Температура испытаний 150°C . Трубчатые образцы имели внешний диаметр $15.5 \pm 0.01 \text{ мм}$, внутренний диаметр $14.0 \pm 0.01 \text{ мм}$ и рабочую часть длиной $100 \pm 0.1 \text{ мм}$.

В закрученном тонкостенном образце напряженное состояние однородно и оно описывается касательным напряжением τ , действующим в плоскости поперечного сечения образца. В начальный момент времени ($t = 0$) к образцу прикладывался крутящий момент, создающий напряжение $\tau(t) = \tau_0 = \text{const}$, при этом напряжении образец испытывался в течение $t_1 = 50 \text{ час}$. По прошествии 50 час образец разгружался и затем снова нагружался таким же по величине, но обратным по направлению крутящим моментом, создающим в образце напряжение $\tau(t) = -\tau_0$, при этом он испытывался еще 50 час.

На рис. 4 результаты испытаний при $\tau = \pm 101.1 \text{ МПа}$ представлены маркером $\times$, при $\tau = \pm 115.6 \text{ МПа}$ — $\bullet$ и $\blacktriangle$, при $\tau = \pm 130 \text{ МПа}$ — $+$, при $\tau = \pm 140 \text{ МПа}$ — $\blacksquare$ и $\blacklozenge$, при $\tau = \pm 147.4 \text{ МПа}$ — $\star$. Для обратного кручения время отсчитывалось с момента, при

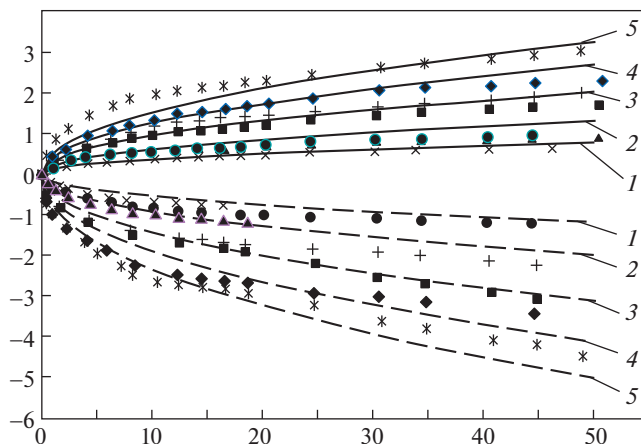


Рис. 4

котором напряжение меняло знак. В случае прямого кручения γ^c означает сдвиговую деформацию ползучести, накопленную после приложения крутящего момента, а в случае обратного кручения γ^c означает абсолютную величину сдвиговой деформации ползучести, накопленной после перемены знака крутящего момента.

Как видно из кривых ползучести, для всех экспериментов абсолютное значение сдвиговой деформации ползучести, накопленной при обратном кручении, значительно больше сдвиговой деформации ползучести, накопленной при прямом кручении. Таким образом, кручение в прямом направлении разупрочняет материал по отношению к кручению в обратном направлении.

Для моделирования полученных результатов воспользуемся стандартной теорией упрочнения (γ^c – деформация ползучести при кручении, B , α , n – константы).

$$(\gamma^c)^\alpha \dot{\gamma}^c = B\tau^n, \quad \text{т.е.} \quad \gamma^c(t) = [(\alpha + 1)B\tau^n t]^{1/(\alpha+1)}, \quad \alpha > 0, \quad n > 1 \quad (5.1)$$

Будем считать, что материальные константы n и α не зависят от знака τ , показатель степени n выражается в виде отношения двух нечетных чисел, показатель α – в виде отношения четного числа к нечетному, а коэффициент B принимает значения B_1 и B_2 при прямом и обратном кручении соответственно. В этом случае уравнение (5.1) можно записать в следующей форме:

$$(\gamma^c)^\alpha \dot{\gamma}^c = B_1 \tau^n q, \quad q = \begin{cases} 1 & \text{при } \tau \\ B_2/B_1 & \text{при } -\tau \end{cases}$$

На рис. 4 приведены теоретические кривые ползучести при $n = 799/99 \approx 8$, $\alpha = 110/101 \approx 1.1$, $B_1 = 0.8 \times 10^{-14} \text{ (МПа)}^{-n} \text{ час}^{-1}$, $B_2 = 2 \times 10^{-14} \text{ (МПа)}^{-n} \text{ час}^{-1}$, при этом теоретические кривые ползучести при прямом кручении представлены сплошными линиями, а при обратном – штриховыми.

Таблица 1

№ кривой	1	2	3	4	5
$ \tau $, МПа	101.1	115.6	130.0	140.0	147.4

6. Заключение. Проведено моделирование результатов трех серий испытаний стержней на ползучесть при переменных нормальных или касательных напряжениях. Применение различных вариантов кинетической теории Ю.Н. Работнова при описании экспериментальных данных приводит к хорошему соответствию экспериментальных и теоретических результатов.

Соответствие номеров теоретических кривых и значений касательных напряжений представлено в табл. 1.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00062).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с. (Перевод: Rabotnov Yu.N. Creep problems in structural members. Amsterdam, North Holland, 1969).
2. Dushin Y.A., Gribov N.N., Ignatov V.A., Medvedev N.A. Structure-stable alloy for structural components of the high-temperature gas-cooled reactor with temperature at 950°C // Elsevier. 1991. V. 16. № 1/2. P. 317–326.
3. Марголин Б.З., Душин Ю.А., Гуленко А.Г., Медведев Н.А. Ползучесть и разрушение структурно-стабильных материалов при нестационарном нагружении и объемном сжатии // Проблемы прочности. 1993. № 2. С. 13–25.
4. Марголин Б.З., Швецова В.А. Влияние скорости деформирования на характер разрушения при статическом и циклическом нагружении. Сообщение 1. Формулировка общих подходов // Проблемы прочности. 1991. № 2. С. 3–14.
5. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит, 2016. 504 с. (перевод: Lokoshchenko A.M. Creep and long-term strength of metals. CISP. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca. Raton. London. New York. 2018. 545 p.)
6. Волков И.А., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Миронов А.А., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н., Сметанин И.В. Модель поврежденной среды для описания длительной прочности конструкционных материалов (металлов и их сплавов) // Проблемы прочности и пластичности. 2017. Т. 79. № 3. С. 285–300.
7. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругости сред с повреждениями. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 424 с.
8. Наместников В.С. Прямое и обратное кручение в условиях ползучести. ПМТФ. 1960. № 1 С. 121–122.