

УДК 539.376

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг2 В УСЛОВИЯХ СТУПЕНЧАТОГО НАГРУЖЕНИЯ

© 2023 г. А. Р. Арутюнян^{1,*}, Р. Р. Саитова^{1,**}

Представлено академиком РАН Н.Ф. Морозовым 14.01.2023 г.

Поступило 21.01.2023 г.

После доработки 21.01.2023 г.

Принято к публикации 07.05.2023 г.

В условиях высокотемпературной ползучести происходит эволюция поврежденности металлических материалов. Для ее описания используется концепция поврежденности Качанова–Работнова. Параметр поврежденности определяется как относительное изменение плотности материала, которая является интегральной характеристикой поврежденности. С учетом этого параметра и закона сохранения массы сформулированы взаимосвязанные кинетические уравнения для деформации ползучести и параметра поврежденности. Получены аналитические решения этих уравнений для случая двухступенчатого нагружения. Проведены экспериментальные исследования одноосного напряженного состояния в условиях высокотемпературной ползучести при двухступенчатом нагружении алюминиевого сплава АМг2 при температуре 250°C. Наблюдается хорошее согласие полученных теоретических кривых с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: ползучесть, длительная прочность, ступенчатое нагружение, поврежденность

DOI: 10.31857/S2686740023040016, **EDN:** WZSLHF

Рассматривается задача ползучести и длительной прочности металлических материалов и сплавов. Под действием относительно низких напряжений и высоких температур металлические материалы становятся хрупкими и разрушаются при небольшой величине остаточных деформаций. Эта проблема известна как проблема тепловой хрупкости металлов. Данный эффект наблюдается в элементах многих важных инженерных объектов, поэтому проблема хрупких разрушений стала предметом многочисленных теоретических и экспериментальных исследований.

Для решения этой проблемы в механике материалов в работах Л.М. Качанова [1], Ю.Н. Работнова [2] была введена концепция сплошности (поврежденности). Для описания хрупкой области экспериментальной кривой длительной прочности была предложена система простых кинетических уравнений для параметра поврежденности и деформации ползучести, а также был сформулирован критерий длительной прочности.

В работе Р.А. Арутюняна [3] предлагается модифицированный вариант системы кинетических уравнений Качанова–Работнова с учетом закона сохранения массы и конкретизации параметра поврежденности в виде отношения текущей величины плотности материала к начальной.

Результаты многочисленных экспериментальных исследований по изменению пористости и плотности различных металлов и сплавов вследствие образования и развития микропор и микротрещин в условиях высокотемпературной ползучести [4–6] позволяют рассматривать плотность в качестве интегральной меры накопления структурных микродефектов.

В данной работе рассматривается модифицированная система уравнений Качанова–Работнова для скорости ползучести и повреждения для случая двухступенчатого нагружения.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводились на лабораторных образцах (рис. 1) алюминиевого сплава АМг2, имеющих форму плоской лопатки со следующими размерами: длина $L = 200$ мм, длина рабочей части $A = 80$ мм, ширина $W = 12.5$ мм, длина захватов $B = 50$ мм, ширина захватов $C = 20$ мм, толщина образца $T = 4.7–5$ мм. Размеры

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: a.arutyunyan@spbu.ru

**E-mail: rigastr@yandex.ru

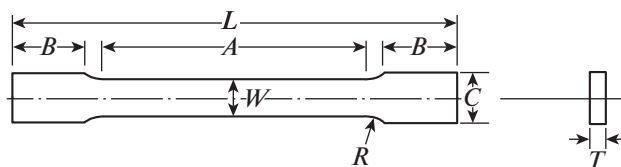


Рис. 1. Форма и размеры лабораторного образца (в мм) согласно ASTM E 139–11: $L = 200$ мм, $A = 80$ мм, $B = 50$ мм, $C = 20$ мм, $W = 12.5$ мм, $R = 12.5$ мм, $T = 4.7\text{--}5$ мм.

лабораторных образцов выбирались согласно стандарту ASTM E 139-11 [7].

Испытания лабораторных образцов выполнялись на универсальном испытательном комплексе SHIMADZU AG-X plus, который позволяет проводить эксперименты на ступенчатое нагружение. Экспериментальная установка оснащена термокамерой модели SHIMADZU MODEL TCE-N300 с контроллером, позволяющая проводить испытания образцов в диапазоне температур от минус 150 до плюс 250°C. Термокамера обеспечивает равномерное распределение поля температуры в рабочей части образцов с погрешностью менее $\pm 1^\circ\text{C}$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ

На первом этапе исследований были проведены эксперименты на растяжение при комнатной температуре и при температуре 250°C. Эксперименты проводились со скоростью 1 мм/мин. Температура окружающего воздуха при проведении испытаний составляла $20 \pm 5^\circ\text{C}$. На рис. 2 представлены полученные экспериментальные диаграммы деформирования при растяжении. Усреднение кривых проводилось по трем образцам. На основании полученных кривых были выбраны оптимальные нагрузки для случая ступенчатого нагружения при ползучести.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ

Экспериментальные исследования процессов ползучести сплава АМг2 в состоянии поставки проводились по схеме ступенчатого нагружения при температуре 250°C. В первом случае сначала образцы испытывались при напряжении 60 МПа в течение 3.5 ч, затем нагрузка снижалась до 45 МПа и эксперимент продолжался до момента разрушения образца (не более 3.5 ч). Во втором случае наоборот: сначала образцы испытывались при напряжении 45 МПа в течение 3.5 ч, затем нагрузка

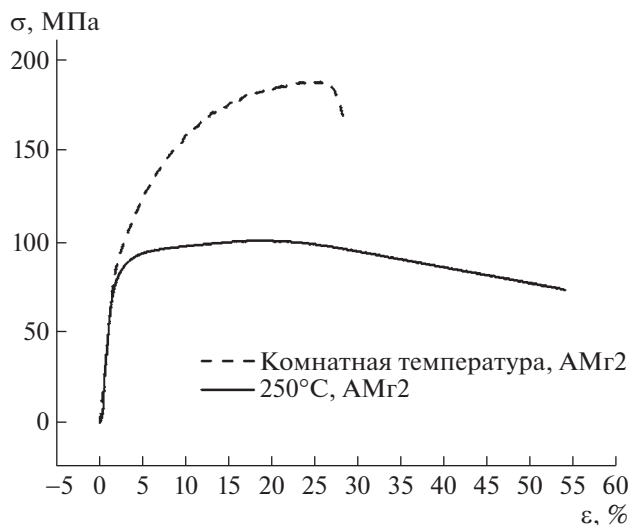


Рис. 2. Диаграммы деформирования при растяжении со скоростью 1 мм/мин при комнатной температуре (штриховая линия) и при температуре 250°C (сплошная линия).

увеличивалась до 60 МПа и эксперимент продолжался также до момента разрушения образца (в течение не более 3.5 ч). Температура окружающего воздуха при проведении испытаний составляла $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТУПЕНЧАТОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

В наших работах [8, 9] был предложен модифицированный вариант системы кинетических уравнений Качанова–Работнова [1, 2] с учетом закона сохранения массы и конкретизации параметра поврежденности в виде относительного изменения плотности материала.

Рассмотрим систему взаимосвязанных кинетических уравнений Р.А. Арутюняна [3] для скорости ползучести и параметра поврежденности:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = B\sigma_0^m \psi^{m-\beta} e^{m\varepsilon}, \quad (1)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -A\sigma_0^n \psi^{n-\alpha} e^{m\varepsilon}, \quad (2)$$

где $\psi = 1 - \omega = \rho/\rho_0$ — сплошность, ρ_0 — начальная, ρ — текущая плотность образца, $B, A, m, n, \alpha, \beta$ — постоянные.

Система уравнений (1), (2) для скорости ползучести и поврежденности может быть решена для случая ступенчатого нагружения. Далее будем рассматривать двухступенчатое нагружение.

Рассмотрим случай чисто хрупкого разрушения и малых деформаций при $e^{m\varepsilon_1} \approx 1 + m\varepsilon_1$,

$e^{n_1 \varepsilon_1} \approx 1 + n_1 \varepsilon_1$ и перепишем систему уравнений (1), (2) в виде:

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt_1} = B_1 \sigma_{01}^{m_1} \psi_1^{m_1 - \beta_1} (1 + m_1 \varepsilon_1), \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_1}{dt_1} = -A_1 \sigma_{01}^{n_1} \psi_1^{n_1 - \alpha_1} (1 + n_1 \varepsilon_1). \quad (4)$$

При условиях $m_1 = \beta_1$, $n_1 = 1 + \alpha_1$ система уравнений (3), (4) сводится к нелинейному дифференциальному уравнению второго порядка [10]. Выразив из (4) ε_1 , получим

$$\varepsilon_1 = -\frac{1}{n_1} - \frac{1}{A_1 \sigma_{01}^{n_1} \psi_1^{n_1 - \alpha_1} n_1} \frac{d\psi_1}{dt_1}. \quad (5)$$

Из (5) найдем $\frac{d\varepsilon_1}{dt_1}$:

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt_1} = -\frac{\psi_1^{\alpha_1 - n_1} \frac{d^2 \psi_1}{dt_1^2}}{A_1 \sigma_{01}^{n_1} n_1} - \frac{\psi_1^{\alpha_1 - n_1 - 1} \left[\frac{d\psi_1}{dt_1} \right]^2 (\alpha_1 - n_1)}{A_1 \sigma_{01}^{n_1} n_1}. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (3), получим нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\psi_1 \frac{d^2 \psi_1}{dt_1^2} - (n_1 - \alpha_1) \left[\frac{d\psi_1}{dt_1} \right]^2 - m_1 B_1 \sigma_{01}^{m_1} \psi_1^{m_1 - \beta_1 + 1} \frac{d\psi_1}{dt_1} - A_1 B_1 \sigma_{01}^{m_1 + n_1} (m_1 - n_1) \psi_1^{m_1 - \beta_1 - \alpha_1 + n_1 + 1} = 0. \quad (7)$$

Принимая условия $m_1 = \beta_1$, $n_1 = 1 + \alpha_1$ и при начальных условиях $t_1 = 0$, $\psi_1 = 1$ из (7), получим выражение для параметра сплошности:

$$\psi_1 = e^{\left[\frac{A_1 \sigma_{01}^{n_1 - m_1} (m_1 - n_1)}{B_1 m_1^2} \left(e^{m_1 B_1 \sigma_{01}^{m_1} t_1} - 1 \right) - \frac{A_1 \sigma_{01}^{n_1} (m_1 - n_1)}{m_1} t_1 \right]}. \quad (8)$$

Учитывая условия $m_1 = \beta_1$, $n_1 = 1 + \alpha_1$ в (3), получим

$$\frac{d\varepsilon_1}{(1 + m_1 \varepsilon_1)} = B_1 \sigma_{01}^{m_1} dt_1. \quad (9)$$

При начальных условиях $t_1 = 0$, $\varepsilon_1 = 0$ из (9) следует

$$\varepsilon_1 = \frac{e^{B_1 m_1 \sigma_{01}^{m_1} t_1} - 1}{m_1}. \quad (10)$$

Для второй ступени нагружения рассмотрим решение уравнения (3) при начальных условиях $t_2 = t_1$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$:

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt_2} = B_2 \sigma_{02}^{m_2} \psi_2^{m_2 - \beta_2} (1 + m_2 \varepsilon_2). \quad (11)$$

Учитывая условия $m_2 = \beta_2$ и начальные условия $t_2 = t_1$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$, в (11) получим

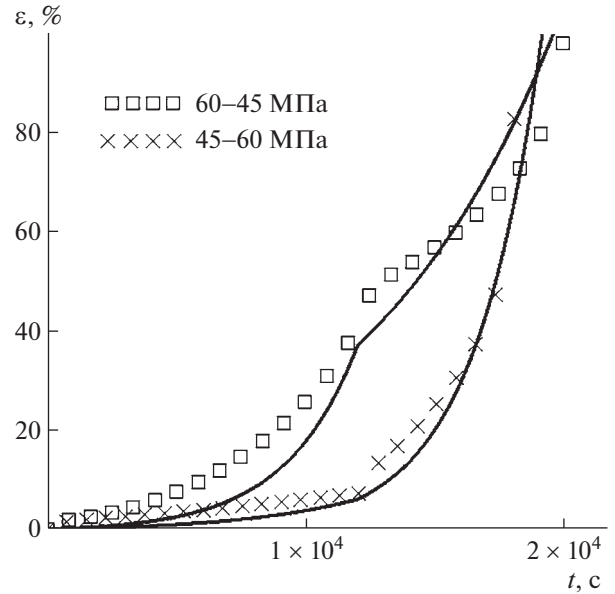


Рис. 3. Экспериментальные и теоретические кривые ползучести сплава АМг2 при двухступенчатых нагружениях при температуре 250°C с действующими напряжениями, равными 45 и 60 МПа.

$$\varepsilon_2 = \frac{e^{\frac{B_2 m_2 \sigma_{02}^{m_2} (t_2 - t_1) + \ln \left[1 + \frac{m_2}{m_1} \left(e^{B_1 m_1 \sigma_{01}^{m_1} t_1} - 1 \right) \right]}}{m_2} - 1}{m_2}. \quad (12)$$

5. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ КРИВЫМИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Теоретические кривые ползучести, согласно решениям (10) и (12), и экспериментальные кривые для сплава АМг2 при двухступенчатом нагружении с напряжениями, равными 45 МПа, 60 МПа, при температуре 250°C показаны на рис. 3.

При расчетах были приняты следующие значения коэффициентов: 45–60 МПа: $\sigma_1 = 45$ МПа, $\sigma_2 = 60$ МПа, $B_1 = 5.3 \times 10^{-8}$ [МПа] $^{-2} \times$ [ч] $^{-1}$, $B_2 = 5.3 \times 10^{-8}$ [МПа] $^{-2} \times$ [ч] $^{-1}$, $m_1 = 2$, $m_2 = 2$;

60–45 МПа: $\sigma_1 = 60$ МПа, $\sigma_2 = 45$ МПа, $B_1 = 5 \times 10^{-8}$ [МПа] $^{-2} \times$ [ч] $^{-1}$, $B_2 = 3.2 \times 10^{-8}$ [МПа] $^{-2} \times$ [ч] $^{-1}$, $m_1 = 2$, $m_2 = 2$.

Как видно из рис. 3, теоретические кривые ползучести, согласно решениям (10) и (12), хорошо описывают полученные в экспериментах кривые ползучести при двухступенчатых нагружениях сплава АМг2. Таким образом, предложенная система взаимосвязанных кинетических уравнений для скорости ползучести и параметра поврежденности позволяет описывать случаи ступен-

чатых нагружений, что говорит об универсальности системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматривается модифицированный вариант системы взаимосвязанных кинетических уравнений Качанова—Работнова с учетом закона сохранения массы и конкретизации параметра поврежденности в виде отношения текущей величины плотности материала к начальной. Получены решения данной системы кинетических уравнений для случая двухступенчатого нагружения.

Проведены экспериментальные исследования одноосного напряженного состояния в условиях ползучести при двухступенчатом нагружении алюминиевого сплава АМг2 при температуре 250°C.

Полученные теоретические кривые ползучести хорошо описывают полученные в экспериментах кривые ползучести при двухступенчатых нагружениях для сплава АМг2. Таким образом, предложенная система взаимосвязанных кинетических уравнений для скорости ползучести и параметра поврежденности позволяет описывать случаи ступенчатых нагружений, что говорит об универсальности системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. 1958. № 8. С. 26–31.
2. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения. Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 5–7.
3. Арутюнян Р.А. Проблема высокотемпературной ползучести и длительной прочности в механике материалов // ДАН. 2017. Т. 475. № 4. С. 386–388.
4. Новожилов В.В. О пластическом разрывлении // ПММ. 1965. № 4. С. 681–689.
5. Betekhtin V.I. Porosity of solids // Trans. St.-Petersburg Acad. Sci. strength problems. 1997. V. 1. P. 201–210.
6. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит, 2015. 506 с.
7. ASTM E 139-11 Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials. 2011. 14 p.
8. Arutyunyan A.R., Saitova R.R. Exact and approximate solutions of the system of interrelated equations of the theory of creep and long-term strength // J. of Physics: Conference Series. 2022. V. 2231. 012001. (Scopus).
9. Arutyunyan A., Arutyunyan R., Saitova R. The Criterion of High-Temperature Creep of Metals Based on Relative Changes of Density // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2019. 14. P. 140–144.
10. Polyanin A.D., Zaitsev V.F. Handbook of Exact Solutions for Ordinary Differential Equations, 2nd ed. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2003. 783 p.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATIONS OF HIGH-TEMPERATURE CREEP OF ENAW 5251 (AMg2) ALUMINUM ALLOY UNDER STEP LOADING

A. R. Arutyunyan^a and R. R. Saitova^a

^a St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Presented by Academician of the RAS N.F. Morozov

In conditions of high-temperature creep, the evolution of the damage of metallic materials is observed. To describe this effect, the damage conception of the Kachanov-Rabotnov is used. The damage parameter is defined as the relative changes of the material density, which is an integral characteristic of the damage. Taking into account this parameter and the law of conservation of mass, interrelated kinetic equations for creep deformation and damage parameter are formulated. Analytical solutions of these equations are obtained for the case of two-stage loading. Experimental studies of uniaxial stress state under conditions of high-temperature creep under two-stage loading of aluminum alloy ENAW 5251 (AMg2) at a temperature of 250°C were conducted. A good agreement of the obtained theoretical curves with the experimental results is observed.

Keywords: creep, long-term strength, step loading, damage