

УДК 539.376:539.434
DOI: 10.15372/PMTF202315261

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ПО ОБРАЗЦУ-ЛИДЕРУ В УСЛОВИЯХ ВЯЗКОГО РАЗРУШЕНИЯ

В. П. Радченко, Е. А. Афанасьева, М. Н. Саушкин

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия
E-mails: radchenko.vp@samgtu.ru, afanasieva.ea@samgtu.ru, saushkin.mn@samgtu.ru

Разработан метод прогнозирования ползучести и длительной прочности на основе данных о поведении ранее испытанного образца (образца-лидера, прототипа) в условиях вязкого разрушения. Предполагается, что у материала при нагружении отсутствуют мгновенно-пластическая деформация и первая стадия ползучести и для него выполняется гипотеза несжимаемости. Показано, что если для образца-лидера известны кривая ползучести при постоянном напряжении и время до его разрушения, то для получения диаграммы реологического деформирования и длительной прочности материала при других значениях напряжения достаточно знать лишь начальную (в начальный момент времени) минимальную скорость деформации ползучести образцов для этих значений напряжения. Выполнена проверка адекватности разработанного метода экспериментальным данным при растяжении образцов из коррозионно-стойкой стали марки 12X18H10T при температуре 850 °С и образцов из титанового сплава при температуре 600 °С, а также при растяжении и кручении образцов из сплава Д16Т при температуре 250 °С. Показано, что результаты прогнозирования не зависят от выбора образца-лидера из ряда образцов, испытанных при различных напряжениях. Обсуждается возможность использования разработанного метода при проведении экспериментальных исследований материалов в условиях ползучести вплоть до их разрушения.

Ключевые слова: прогнозирование, ползучесть, длительная прочность, вязкое разрушение, образец-лидер

1. Постановка задачи. В настоящее время важной задачей проектирования и эксплуатации элементов конструкций при высоких температурах является прогнозирование неупругой деформации и длительной прочности материалов в условиях ползучести. Данная задача наиболее актуальна при проектировании сложных и потенциально опасных объектов в авиадвигателестроении, энергомашиностроении, атомной, химической промышленности и других областях [1–4]. Значительная часть исследований в области реологического деформирования посвящена разработке феноменологических моделей поведения материалов — уравнений состояния ползучести и длительной прочности, являющихся основой для решения соответствующих краевых задач. Построение таких реологических моделей возможно при наличии экспериментальных данных, как правило, в виде кривых стационарной ползучести образцов при постоянных напряжениях. Существует боль-

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

© Радченко В. П., Афанасьева Е. А., Саушкин М. Н., 2023

шое количество работ, в которых построены определяющие соотношения при ползучести (см., например, [5–8]). Построение феноменологических уравнений состояния, описывающих реологическое деформирование материала с учетом накопления поврежденности, существенно затруднено вследствие необходимости проведения технически сложного эксперимента в условиях высоких температур, большой длительности и энергозатратности испытаний и т. д. [9–12]. Поэтому в первую очередь следует провести экспериментальные исследования для получения первичных кривых стационарной ползучести.

Отметим основные трудности, возникающие при построении феноменологических моделей поведения материалов:

1) необходимость проведения серии испытаний на ползучесть при различных значениях напряжения в течение $10^4 \div 10^6$ ч в лабораторных условиях, что крайне сложно, а зачастую и невозможно;

2) большой разброс экспериментальных данных при ползучести, вследствие чего для получения надежной информации требуется иметь несколько образцов, испытываемых при одном и том же значении напряжения;

3) необходимость учитывать при построении феноменологических уравнений ползучести материала с учетом накопления поврежденности механизмов разрушения в зависимости от напряжения и температуры.

В настоящее время установлено три типа накопления поврежденности в металлах вследствие нагружений [5, 9, 10, 12]:

1) внутрзеренное накопление повреждений при больших значениях напряжения и температуры (в моделях ползучести соответствует схеме вязкого разрушения);

2) межзеренное накопление повреждений в результате зарождения, развития и слияния различных дефектов (пор, трещин) при относительно малых значениях напряжения и температуры с длительностью до разрушения образца $10^4 \div 10^6$ ч (соответствует схеме хрупкого разрушения);

3) межзеренное накопление повреждений в результате образования клиновидных трещин при средних напряжениях с длительностью до разрушения порядка $100 \div 1000$ ч (соответствует схеме смешанного разрушения).

С учетом сказанного выше на основе построенных уравнений состояния наиболее надежные экспериментальные и теоретические результаты можно получить, учитывая один механизм разрушения материала. Формальная экстраполяция результатов расчетов по модели, построенной для одного типа разрушения, на напряжения, соответствующие другому типу разрушения, даже в случае изотермической ползучести приводит к существенной погрешности.

В данной работе исследуется ползучесть в условиях вязкого разрушения материала. Разрабатывается метод прогнозирования стационарных кривых ползучести и времени до разрушения материала при различных постоянных напряжениях по экспериментальным данным для одного образца-лидера. Указанный метод основан на обобщении аналогичного подхода, разработанного в [13] для первой и второй стадий ползучести.

2. Метод прогнозирования ползучести и длительной прочности материала по образцу-лидеру. В основе предлагаемого метода лежит возможность по установленным параметрам длительной прочности определять параметры установившейся ползучести [14–18]. Экспериментально получена зависимость [14–16, 18]

$$(\dot{p}_{\min})^k t^* = a, \quad (1)$$

где \dot{p}_{\min} — скорость установившейся ползучести; t^* — время до разрушения; k , a — параметры материала.

Зависимость (1) в частном случае $k = 1$ впервые была получена и обоснована в работе [15]. Соотношение (1) представляет собой феноменологическую зависимость, полученную в результате обработки экспериментальных данных для различных материалов. Однако данная зависимость может быть получена также теоретически с использованием схемы вязкого разрушения [5, 8–12]. В этом случае предполагается, что разрушение образца происходит при большом удлинении и сопровождается появлением шейки. При этом вводятся следующие ограничения и гипотезы: 1) у материала отсутствует первая стадия ползучести; 2) в момент нагружения мгновенно-упругая и пластическая деформации не учитываются; 3) деформация ползучести по длине образца является однородной вплоть до момента образования шейки, при этом выполняется гипотеза несжимаемости материала.

Рассмотрим цилиндрический образец и введем следующие обозначения: x , x_0 — текущая и начальная длина образца; F , F_0 — текущая и начальная площадь поперечного сечения; $\sigma_0 = Q/F_0$, $\sigma = Q/F$ — номинальное и истинное напряжения; Q — приложенная к образцу нагрузка.

Пусть деформация ползучести p удовлетворяет уравнению

$$\dot{p} = f(\sigma), \quad (2)$$

а в качестве меры деформации образца используется зависимость

$$p = \ln(x/x_0). \quad (3)$$

Тогда из условия несжимаемости деформации ползучести $xF = x_0F_0$ следует

$$\sigma = \sigma_0 e^p; \quad (4)$$

$$p = \ln(\sigma/\sigma_0). \quad (5)$$

Из (5), (2) можно получить зависимость для определения величины $\sigma = \sigma(t)$:

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma(t)} \frac{d\xi}{\xi f(\xi)} = t. \quad (6)$$

Представим функцию $f(\sigma)$ в (2) в виде степенной зависимости

$$f(\sigma) = a\sigma^n. \quad (7)$$

Тогда из (6), (7) получаем

$$\sigma(t)/\sigma_0 = (1 - ant\sigma_0^n)^{-1/n}, \quad (8)$$

а из (8), (5) находим

$$p(t) = -n^{-1} \ln |1 - ant\sigma_0^n|. \quad (9)$$

Из (9) следует, что зависимость $p = p(t)$ имеет вертикальную асимптоту. На заключительной стадии деформирования в некоторой точке A кривой ползучести при $\sigma_0 = \text{const}$ образуется шейка. “Однако абсцисса точки A и абсцисса асимптоты отличаются мало. . . Это дает основание принимать за время разрушения время достижения кривой ползучести ее асимптоты. . .” [12. С. 353], т. е. время до разрушения $t = t^*$ можно определить, полагая $\sigma(t^*) = \infty$, а значит, и $p(t^*) = \infty$. Тогда из (9) следует

$$t^*(\sigma_0) = (an\sigma_0^n)^{-1}. \quad (10)$$

Учитывая, что $a\sigma_0^n$ — значение мгновенной и минимальной скорости установившейся ползучести в начальный момент времени ($t = 0$), т. е. $a\sigma_0^n = \dot{p}_0(\sigma_0) = \dot{p}_{\min}$, из (10) находим зависимость

$$t^* \dot{p}_{\min} = n^{-1},$$

которая является частным случаем (1) при $k = 1$. Из формулы (10) следует, что если $\sigma_0 = \text{const}$, то эта зависимость фактически описывает диаграмму длительной прочности.

Формула (10) была обобщена в работе [19] для $\sigma_0 = \sigma_0(t)$. Подставляя (4) в (2), с использованием аппроксимации (7) получаем уравнение

$$e^{-np} \dot{p} = a[\sigma_0(t)]^n,$$

которое позволяет найти время до разрушения $t = t^*$ ($p(t^*) = \infty$) из интегрального соотношения

$$\int_0^{t^*} na[\sigma_0(t)]^n dt = 1. \quad (11)$$

Если ввести функцию $\hat{t}(\sigma_0) = (na[\sigma_0(t)]^n)^{-1}$, то (11) можно записать в виде

$$\int_0^{t^*} \frac{dt}{\hat{t}(\sigma_0(t))} = 1. \quad (12)$$

Условие (12) представляет собой принцип Робинсона линейного суммирования повреждений [19]. Теоретически он справедлив лишь в случае вязкого разрушения и введенных ранее ограничений.

Зависимости (9), (10) получены в предположении вязкого разрушения. В этом случае увеличение истинного напряжения обусловлено лишь уменьшением площади поперечного сечения образца в соответствии с гипотезой несжимаемости материала. Однако при вязком механизме разрушения наблюдается внутризеренное накопление повреждений [5, 9, 12]. Поэтому помимо уменьшения площади поперечного сечения, которое регистрируется датчиками экспериментальной установки, наблюдается накопление различных дефектов, что приводит к дополнительному уменьшению эффективной площади поперечного сечения, воспринимающего нагрузку. Поэтому в работе [20] для учета поврежденности в условиях вязкого разрушения предложена экспериментально обоснованная зависимость между истинным σ и номинальным σ_0 напряжениями в виде

$$\sigma = \sigma_0 e^{sp}, \quad (13)$$

где $s \geq 1$ — феноменологический параметр, значение которого для некоторых материалов может достигать нескольких десятков. При $s = 1$ из (13) непосредственно следует (4). Из (2), (7), (13) получаем зависимости

$$p(t) = -(sn)^{-1} \ln(1 - anst\sigma_0^n); \quad (14)$$

$$t^*(\sigma_0) = (ans\sigma_0^n)^{-1}, \quad (15)$$

совпадающие при $s = 1$ с (9) и (10) соответственно. Поэтому далее для теоретического обоснования развиваемого метода прогнозирования деформации ползучести и времени до разрушения материала по образцу-лидеру в условиях вязкого разрушения будем использовать соотношения (14), (15).

Предположим, что экспериментально получена кривая деформирования материала вплоть до момента разрушения для образца-лидера при номинальном напряжении σ_0 . Запишем (15) в виде

$$t^*(\sigma_0) = (ns\dot{p}_0(\sigma_0))^{-1}, \quad (16)$$

где $\dot{p}_0(\sigma_0) = a\sigma_0^n$ — начальная минимальная скорость установившейся ползучести для образца-лидера. Пусть исследуемый образец испытывается при номинальном напряжении σ_1 и зафиксирована его начальная скорость $\dot{p}_0(\sigma_1) = a\sigma_1^n$. Тогда, записывая для этого образца соотношение, аналогичное (16), для времени разрушения $t_1(\sigma_1)$ получаем

$$t_1(\sigma_1) = t^*(\sigma_0) \frac{\dot{p}_0(\sigma_0)}{\dot{p}_0(\sigma_1)}. \quad (17)$$

Таким образом, если известны начальная скорость ползучести $\dot{p}_0(\sigma_0)$ образца-лидера и время до его разрушения, а также начальная скорость ползучести исследуемого образца $\dot{p}_0(\sigma_1)$, то время до разрушения исследуемого образца можно получить на основе (17).

Покажем, что помимо времени до разрушения можно прогнозировать кривую деформации исследуемого образца при любом напряжении по известной кривой ползучести образца-лидера. Для этого в соотношении (14) необходимо поменять местами аргумент и функцию, т. е. найти зависимость времени от деформации и напряжения:

$$t(p, \sigma_0) = \frac{1 - e^{-nsp}}{ans\sigma_0^n} = \frac{1 - e^{-nsp}}{ns\dot{p}_0(\sigma_0)}. \quad (18)$$

Запишем аналогичную зависимость для номинального напряжения σ_1 исследуемого образца:

$$t(p, \sigma_1) = \frac{1 - e^{-nsp}}{sk\dot{p}_0(\sigma_1)}. \quad (19)$$

Тогда из (18), (19) для времени достижения при напряжениях σ_0 (для образца-лидера) и σ_1 (для исследуемого образца) одного и того же значения деформации ползучести p получаем

$$t(p, \sigma_1) = t(p, \sigma_0) \frac{\dot{p}_0(\sigma_0)}{\dot{p}_0(\sigma_1)}. \quad (20)$$

Таким образом, из (20) следует, что кривая ползучести исследуемого образца при номинальном напряжении σ_1 может быть получена с помощью преобразования подобия кривой ползучести образца-лидера при номинальном напряжении σ_0 с коэффициентом подобия, равным отношению начальных скоростей деформации образца-лидера и исследуемого образца $\dot{p}_0(\sigma_0)/\dot{p}_0(\sigma_1)$.

3. Проверка адекватности моделей прогнозирования ползучести и длительной прочности материала экспериментальным данным. Для проверки адекватности моделей прогнозирования ползучести и длительной прочности материала экспериментальным данным использовались известные данные.

Наиболее подробная экспериментальная информация о ползучести и длительной прочности коррозионно-стойкой стали марки 12X18H10T при температуре 850 °С представлена в [21–23]. Для реализации предлагаемого в настоящей работе метода использовались данные работы [23].

На рис. 1 сплошными линиями показаны экспериментальные кривые ползучести при значениях напряжения $\sigma_0 = 40, 50, 60, 80$ МПа, осредненные по 6, 7, 6 и 2 образцам соответственно. В качестве образца-лидера использовался образец при $\sigma_0 = 40$ МПа (кривая 1). В табл. 1 приведены экспериментальные значения начальной скорости установившейся ползучести $\dot{p}_0(\sigma_0)$ и времени до разрушения t_1^* при указанных выше значениях номинального напряжения σ_0 [23]. С использованием этих экспериментальных значений по формуле (17) получены значения времени до разрушения t_2^* . Для сравнения в табл. 1 приведены значения времени до разрушения t_3^* , вычисленные по модели, предложенной в [23] и имеющей вид

$$\dot{p} = a \frac{\text{sh}(\sigma/c)}{(1-\omega)^n}, \quad \dot{\omega} = b \frac{\sigma^k}{(1-\omega)^k}, \quad (21)$$

где ω — параметр поврежденности; a, b, c, n, k — параметры модели, значения которых приведены в [21–23].

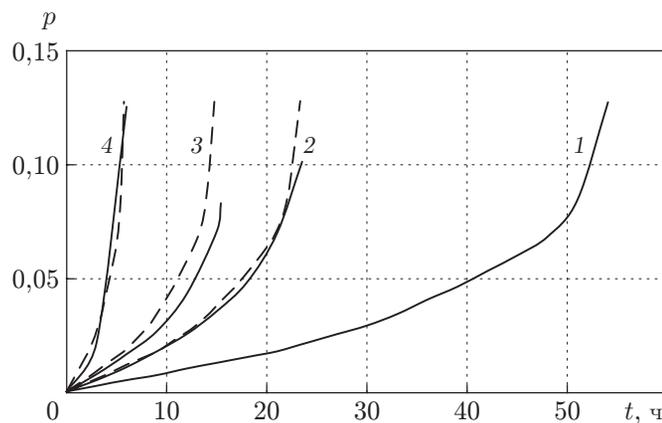


Рис. 1. Экспериментальные [23] (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) кривые ползучести для коррозионно-стойкой стали марки 12X18H10T при температуре 850 °С и различных значениях номинального напряжения:

1 — $\sigma_0 = 40$ МПа (образец-лидер), 2 — $\sigma_0 = 50$ МПа, 3 — $\sigma_0 = 60$ МПа, 4 — $\sigma_0 = 80$ МПа

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные значения длительной прочности стали марки 12X18H10T при температуре 850 °С

σ_0 , МПа	Эксперимент [23]		Расчет			
	$\dot{p}_0(\sigma_0)$, ч ⁻¹	t_1^* , ч	t_2^* , ч	t_3^* , ч	Δ_2 , %	Δ_3 , %
40	0,000 82	54,0	54,00	51,0	—	5,6
50	0,001 90	23,5	23,30	25,2	0,85	7,2
60	0,003 00	15,4	14,80	14,1	3,90	8,4
80	0,007 70	6,0	5,75	5,7	4,20	5,0

В последних двух графах табл. 1 приведены значения относительных погрешностей Δ_2 и Δ_3 , вычисленные по формуле

$$\Delta_i = \left| \frac{t_i^* - t_1^*}{t_1^*} \right| \cdot 100 \%, \quad i = 2, 3 \quad (22)$$

для моделей (17) и (21) соответственно. Из представленных данных следует, что погрешность вычисления времени до разрушения по модели (17) для стационарных кривых ползучести меньше, чем по более сложной модели (21), при этом для построения модели (21) использовались все четыре экспериментальные кривые ползучести вплоть до разрушения. На рис. 1 штриховыми линиями показаны расчетные зависимости деформации ползучести от времени, полученные по формуле (20), при этом использовались лишь экспериментальные данные для образца-лидера (линия 1) и значения начальной скорости деформации ползучести для остальных образцов (линии 2–4).

Следует отметить, что разработанный метод прогнозирования длительной прочности и кривой ползучести в асимптотическом приближении с неограниченной деформацией в момент разрушения не противопоставляется модели, предложенной в [21–23], в которой прогнозируется не только длительная прочность, но и деформация ползучести в момент разрушения.

Рассмотрим экспериментальные данные о деформации ползучести титанового сплава при температуре 600 °С, приведенные в работе [24] и представленные на рис. 2 сплошными линиями. По этим данным определялись начальная скорость деформации ползучести

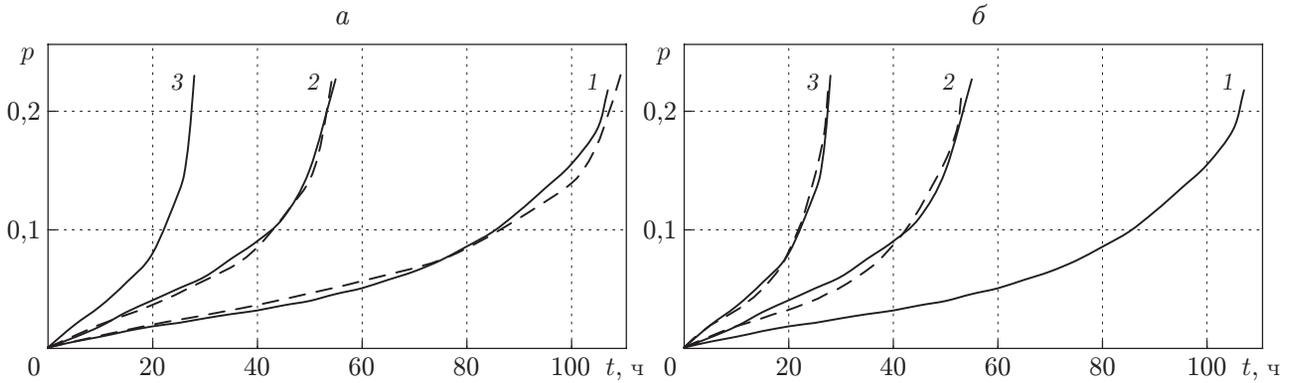


Рис. 2. Экспериментальные [24] (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) кривые ползучести для титанового сплава при температуре 600 °С и различных значениях номинального напряжения: 1 — $\sigma_0 = 400$ МПа, 2 — $\sigma_0 = 350$ МПа, 3 — $\sigma_0 = 300$ МПа

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные значения длительной прочности титанового сплава при температуре 600 °С

σ_0 , МПа	Эксперимент [24]		Расчет			
	$\dot{p}_0(\sigma_0)$, ч ⁻¹	t_1^* , ч	Образец-лидер 3 (линия 3 на рис. 2,а)		Образец-лидер 1 (линия 1 на рис. 2,б)	
			t_2^* , ч	Δ_2 , %	t_2^* , ч	Δ_2 , %
300	0,000 59	107	109,5	2,1	107,0	—
350	0,001 20	55	54,4	2,4	53,2	4,4
400	0,002 30	28	28,0	—	27,4	2,1

$\dot{p}_0(\sigma_0)$ и время до разрушения t_1^* , значения которых приведены в табл. 2. На рис. 2,а в качестве образца-лидера использовался образец 3, а на рис. 2,б — образец 1. На рис. 2 штриховыми линиями показаны расчетные зависимости деформации ползучести от времени, полученные с использованием формулы (20), в табл. 2 приведены расчетные значения времени до разрушения t_2^* , вычисленные по формуле (17), и погрешности Δ_2 величины t_2^* относительно экспериментального значения t_1^* , полученные по формуле (22). Из приведенных на рис. 2 и в табл. 2 данных следует, что результаты расчетов по формулам (17) и (20) практически не зависят от выбора образца-лидера.

Применим разработанный подход к экспериментальным данным, приведенным в работе [25], для разных видов нагружения — одноосного растяжения (рис. 3,а) и кручения (рис. 3,б) образцов в условиях ползучести. В работе [25] диаграммы деформирования представлены в координатах время — удельная работа напряжений на деформациях

$$A(t) = \int_0^t \sigma_{ij} dp_{ij}. \text{ В соотношениях (17), (20) начальные скорости деформации } \dot{p}_0 \text{ заменяются}$$

на начальные значения скорости работы \dot{A}_0 (удельной мощности) в начальный момент времени ($t = 0$). В данном случае в качестве образца-лидера рассматривается образец при номинальном напряжении $\sigma_0 = 70$ МПа (точки 4 на рис. 3,а). С использованием экспериментальных данных, представленных на рис. 3, вычислены начальные скорости \dot{A}_0

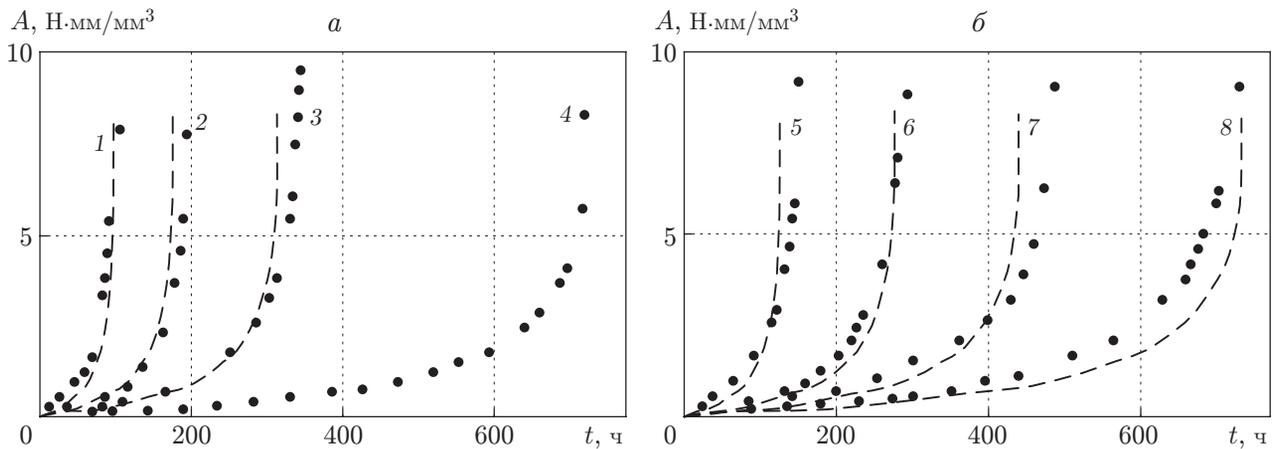


Рис. 3. Экспериментальные [25] (точки) и расчетные (штриховые линии) диаграммы для удельной работы напряжений на деформациях ползучести для сплава Д16Т при температуре 250 °С:

a — одноосное растяжение (1 — $\sigma_0 = 100$ МПа, 2 — $\sigma_0 = 90$ МПа, 3 — $\sigma_0 = 80$ МПа, 4 — $\sigma_0 = 70$ МПа (образец-лидер)); *б* — кручение (5 — $\sigma_0 = 46,2$ МПа, 6 — $\sigma_0 = 40,5$ МПа, 7 — $\sigma_0 = 37,0$ МПа, 8 — $\sigma_0 = 34,6$ МПа)

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные значения длительной прочности сплава Д16Т при растяжении при температуре 250 °С

σ_0 , МПа	Эксперимент [25]		Расчет	
	\dot{A}_0 , Н·мм·ч/мм ³	t_1^* , ч	t_2^* , ч	Δt_2 , %
70	$1,65 \cdot 10^{-3}$	719	719	—
80	$3,78 \cdot 10^{-3}$	345	314	9,0
90	$6,74 \cdot 10^{-3}$	195	176	9,7
100	$1,21 \cdot 10^{-2}$	107	98	8,4

для обоих видов нагружения, значения которых приведены в табл. 3, 4. В табл. 3, 4 указаны значения времени до разрушения t_2^* , вычисленные по формуле (17) с соответствующей заменой \dot{p}_0 (для случая растяжения) и $\dot{\tau}_0$ (для случая сжатия) на \dot{A}_0 при различных постоянных значениях растягивающих и касательных напряжений, а также погрешности Δt_2 определения величины t_2^* относительно t_1^* . Штриховыми линиями на рис. 3 показаны расчетные диаграммы для работы $A(t)$, полученные с использованием (20). Таким образом, прогнозирование кривых ползучести по одному образцу-лидеру возможно также для разных видов напряженного состояния. В целом наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных как для длительной прочности, так и для удельной работы напряжений на деформациях.

Следует отметить, что в работе [25] описываются экспериментальные исследования, выполненные с учетом изменения (уменьшения) площади поперечного сечения образцов, и внешняя приложенная нагрузка корректируется таким образом, чтобы номинальные напряжения (с учетом пересчета площади сечения) σ_0 и τ_0 были постоянными. Поэтому пересчет экспериментальных и расчетных диаграмм в координатах t – $A(t)$ в диаграммы в координатах время — деформация ползучести не вызывает затруднений. Приведенные на рис. 3 значения работы A достаточно умножить на масштабный коэффициент $1/\sigma_0$ при растяжении и на $1/(\sqrt{3}\tau_0)$ при кручении. Такое масштабирование графиков вдоль

Таблица 4

Экспериментальные и расчетные значения длительной прочности сплава Д16Т при кручении при температуре 250 °С

τ_0 , МПа	Эксперимент [25]		Расчет	
	\dot{A}_0 , Н·мм·ч/мм ³	t_1^* , ч	t_2^* , ч	Δt_2 , %
34,6	$1,62 \cdot 10^{-3}$	730	732,3	0,3
37,0	$2,70 \cdot 10^{-3}$	487	439,4	9,8
40,5	$4,30 \cdot 10^{-3}$	293	276,0	5,8
46,2	$9,46 \cdot 10^{-3}$	150	125,4	16,4

оси ординат не приводит к изменению параметров длительной прочности и погрешности расчетных диаграмм при каждом рассматриваемом значении номинального напряжения.

4. Анализ результатов и выводы. Таким образом, разработан метод прогнозирования кривых стационарной ползучести и времени до разрушения материала для исследуемых образцов по начальной (минимальной) скорости ползучести на начальном участке диаграммы деформирования этих образцов и на кривой ползучести образца-лидера в условиях вязкого разрушения.

Проанализируем возможность использования полученных в данной работе результатов. Выше отмечались технические сложности проведения экспериментальных исследований в условиях ползучести, обусловленные, в частности, длительностью эксперимента (см., например, рис. 3). Поэтому из результатов данной работы следует возможность упрощения экспериментальных исследований для получения стационарных кривых ползучести и прогнозирования времени до разрушения при постоянном напряжении. Достаточно провести испытания при одном и том же значении напряжения для трех-пяти образцов (в условиях реологического деформирования имеет место существенный разброс экспериментальных данных [11–13]), построить осредненную кривую ползучести и выбрать ее в качестве образца-лидера. Далее, зафиксировав начальную скорость ползучести в испытаниях исследуемого образца при любом другом значении напряжения, с использованием соотношения (17) необходимо найти время до разрушения, а с использованием формулы (20) построить прогнозируемую кривую реологического деформирования исследуемого образца. При этом отсутствует необходимость продолжать эксперимент вплоть до разрушения, достаточно построить начальный участок кривой ползучести. Выполнив серию экспериментов (как правило, для 3–5 образцов) по определению начальной скорости деформации ползучести образцов при заданном напряжении и осреднив результаты, с помощью формул (17) и (20) можно получить осредненную кривую деформирования и время до разрушения. При этом для контроля один из образцов можно экспериментальным путем довести до разрушения.

Таким образом, можно построить осредненные кривые стационарной ползучести и определить время до разрушения при выбранных значениях напряжения, а по этим данным построить соответствующую феноменологическую модель ползучести разупрочняющейся среды. При этом можно, во-первых, уменьшить количество экспериментов, а во-вторых, спрогнозировать время испытаний конкретного образца и тем самым оптимальным образом спланировать загруженность испытательного оборудования.

В заключение рассмотрим проблему выбора образца-лидера. В данной работе показано (см. п. 3), что в случае отсутствия первой стадии ползучести результаты расчетов не зависят от выбора образца-лидера. Поэтому, если в эксперименте даже для первого образца имеют место лишь вторая и третья стадии ползучести при постоянном заданном начальном напряжении σ_0^I , то этот образец можно выбрать в качестве образца-лидера.

Тогда очевидно, что для всех $\sigma_0^2 > \sigma_0^1$ на кривых ползучести также будет отсутствовать первая стадия и, следовательно, предложенный в работе метод является эффективным. При напряжениях $\sigma_0^3 < \sigma_0^1$ этот метод может быть использован в отсутствие первой стадии, что устанавливается по начальному участку экспериментальной кривой ползучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Loktionov V., Lyubashevskaya I., Terentyev E.** The regularities of creep deformation and failure of the VVER's pressure vessel steel 15Kh2NMFA-A in air and argon at temperature range 500–900 °C // Nuclear Materials Energy. 2021. V. 28. 101019. DOI: 10.1016/j.nme.2021.101019.
2. **Loktionov V., Lyubashevskaya I., Sosnin O., Terentyev E.** Short-term strength properties and features of high-temperature deformation of VVER reactor pressure vessel steel 15Kh2NMFA-A within the temperature range 20–1200 °C // Nuclear Materials Energy. 2019. V. 352. 110118. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2019.110188.
3. **Банщикова И. А., Никитенко А. Ф.** Ползучесть осесимметрично нагруженных пластин с учетом накопления повреждений в их материале // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 5. С. 156–168.
4. **Никитенко А. Ф., Любашевская И. В.** Долговечность сосудов высокого давления // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 5. С. 173–182.
5. **Локоценко А. М.** Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит, 2016.
6. **Локоценко А. М.** Результаты исследований ползучести и длительной прочности металлов в Научно-исследовательском институте механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (к юбилею Ю. Н. Работнова) // ПМТФ. 2014. Т. 55, № 1. С. 144–165.
7. **Локоценко А. М.** Применение кинетической теории при анализе длительного высокотемпературного разрушения металлов в условиях сложного напряженного состояния (обзор) // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 4. С. 149–164.
8. **Локоценко А. М., Фомин Л. В., Терауд В. В. и др.** Ползучесть и длительная прочность металлов при нестационарных сложных напряженных состояниях (обзор) // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 24, № 2. С. 275–318. DOI: 10.14498/vsgtu1765.
9. **Волков И. А.** Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И. А. Волков, Ю. Г. Коротких. М.: Физматлит, 2008.
10. **Никитенко А. Ф.** Ползучесть и длительная прочность металлических материалов. Новосибирск: Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т, 1997.
11. **Радченко В. П.** Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций / В. П. Радченко, Ю. А. Еремин. М.: Машиностроение-1, 2004.
12. **Работнов Ю. Н.** Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966.
13. **Радченко В. П., Афанасьева Е. А.** Прогнозирование индивидуальных деформационных характеристик элементов конструкций по изделию-лидеру // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 26, № 3. С. 500–519. DOI: 10.14498/vsgtu1919.
14. **Lundin C. D., Aronson A. H., Jackman L. A., Clough W. R.** Very-short-time, very-high-temperature creep rupture of type 347 stainless steel and correlation of data // J. Basic Engng. 1969. V. 91, N 1. P. 32–38. DOI: 10.1115/1.3571023.
15. **Hoff N. J.** The necking and the rupture of rods subjected to constant tensile loads // J. Appl. Mech. 1953. V. 20, N 1. P. 105–108. DOI: 10.1115/1.4010601.
16. **Можаровская Т. Н.** О зависимости времени до разрушения при длительном нагружении в условиях плоского напряженного состояния от минимальной скорости деформаций ползучести // Пробл. прочности. 1982. № 12. С. 51–54.

17. **Можаровская Т. Н., Можаровский В. Н., Штефан Н. И.** О зависимости времени до разрушения и установившейся скорости деформаций ползучести конструкционных материалов // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Машинобудування. 2010. № 59. С. 37–40.
18. **Можаровская Т. Н., Можаровский В. Н., Штефан Н. И.** О взаимосвязи основных характеристик ползучести и долговечности конструкционных материалов // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Машинобудування. 2011. № 63. С. 185–187.
19. **Robinson E. L.** Effect of temperature variation on the long-time rupture strength of steels // Trans. ASME. 1952. V. 74, N 5. P. 777–780. DOI: 10.1115/1.4015916.
20. **Лепин Г. Ф.** Ползучесть металлов и критерии жаропрочности. М.: Металлургия, 1976.
21. **Локощенко А. М., Шестериков С. А.** Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении // ПМТФ. 1980. № 3. С. 155–159.
22. **Локощенко А. М., Шестериков С. А.** Модель длительной прочности с немонотонной зависимостью деформации при разрушении от напряжения // ПМТФ. 1982. № 1. С. 160–163.
23. **Закономерности** ползучести и длительной прочности: Справ. / Под общ. ред. С. А. Шестерикова. М.: Машиностроение, 1983.
24. **Omprakash S. M., Kumar A., Srivathsa B., Satyanarayana D. V. V.** Prediction of creep curves of high temperature alloys using θ -projection concept // Procedia Engng. 2013. N 55. P. 756–759. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.327.
25. **Соснин О. В.** Энергетический вариант теории ползучести / О. В. Соснин, Б. В. Горев, А. Ф. Никитенко. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН, 1986.

*Поступила в редакцию 13/II 2023 г.,
после доработки — 11/V 2023 г.
Принята к публикации 26/VI 2023 г.*
