

## ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ИСТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ НА ХОЛОДНУЮ ПОЛЗУЧЕСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

**Объект и цель научной работы.** Исследуется влияние предварительного пластического деформирования прямого и обратного знака на свойства титанового сплава в условиях холодной ползучести. Сопоставлена ползучесть сплава в условиях одноосного растяжения и одноосного сжатия.

**Материалы и методы.** Для описания ползучести использован предложенный ранее метод, основанный на испытаниях образцов в условиях постоянной скорости суммарной деформации в широком диапазоне указанной скорости (5 порядков). Соотношение теории упрочнения содержит напряжение, остаточную деформацию (деформацию ползучести) и скорость остаточной деформации. Эксперимент проводился на испытательных машинах серии «Инстрон-8800».

**Основные результаты.** Показано, что параметры, характеризующие холодную ползучесть сплава, и соответствующие кривые ползучести существенно зависят от знака напряжения. Расчетные и экспериментальные значения скорости ползучести хорошо согласуются. Влияние предварительного пластического деформирования также существенно зависит от знака: при изменении знака деформирования имеет место значительное усиление ползучести (аналог эффекта Баушингера). Для описания указанного явления получены параметры получившего пластическую деформацию материала. Исследовано присутствие деформации ползучести и возможность использования закона Герстнера при медленной разгрузке.

**Заключение.** Предложенный ранее метод описания влияния фактора времени на деформирование титанового сплава при климатических температурах использован для предварительно деформированного материала и при изменении знака нагружения. Экспериментальные кривые ползучести согласуются с расчетными.

**Ключевые слова:** ползучесть, вид напряженного состояния, история нагружения, разгрузка.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Михайлов Э.Ю., Нигматуллин В.И., Рыбакина О.Г. Влияние вида напряженного состояния и истории нагружения на холодную ползучесть титанового сплава. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 3(385): 50–60.

УДК 624.042:669.295.5

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-50-60

E.Yu. Mikhailov, V.I. Nigmatullin, O.G. Rybakina  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## EFFECT OF STRESS STATE TYPE AND LOADING HISTORY ON TITANIUM ALLOY COLD CREEP

**Object and purpose of research.** The paper investigates how preliminary direct or reverse plastic strains influence on the titanium alloy creep properties. The alloy creep behavior under uniaxial tension and compression is compared.

**Materials and methods.** The material creep behavior is described using a method suggested earlier. It is based on specimen testing under constant rate of the total strain in a wide range of aforementioned strain rate (5 orders of magnitude). The hardening theory used relates stress, residual strain and residual strain rate (in particular case creep strain). The experiments were performed on Instron-8800 test machines.

**Main results.** It is shown that creep parameters of the alloy and corresponding creep curves significantly depend on the stress sign. The calculations well predict the experimental values of the creep strain rate. The effect of the preliminary plastic strain significantly depends on the sign of strain. In case the preliminary residual and the creep strain are opposite in sign, the creep is considerably enhanced (it is analogous to Bauschinger effect). In order to describe this phenomenon, parameters of the material after plastic strain, different from the parameters of the virgin material, are obtained. The occurrence of the creep effect under slow load release, that is related to the applicability of the Gerstner law, is studied.

**Conclusion.** A method suggested earlier for describing the titanium alloy time-dependent response under climatic temperatures is used in this study with reference to material subjected to preliminary strain and in case of loading sign change. Experimental creep curves are in good agreement with calculations.

**Key words:** creep, type of stress state, loading time history, load release.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Mikhailov E.Yu., Nigmatullin V.I., Rybakina O.G. Effect of stress state type and loading history on titanium alloy cold creep. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 3(385): 50–60 (in Russian).

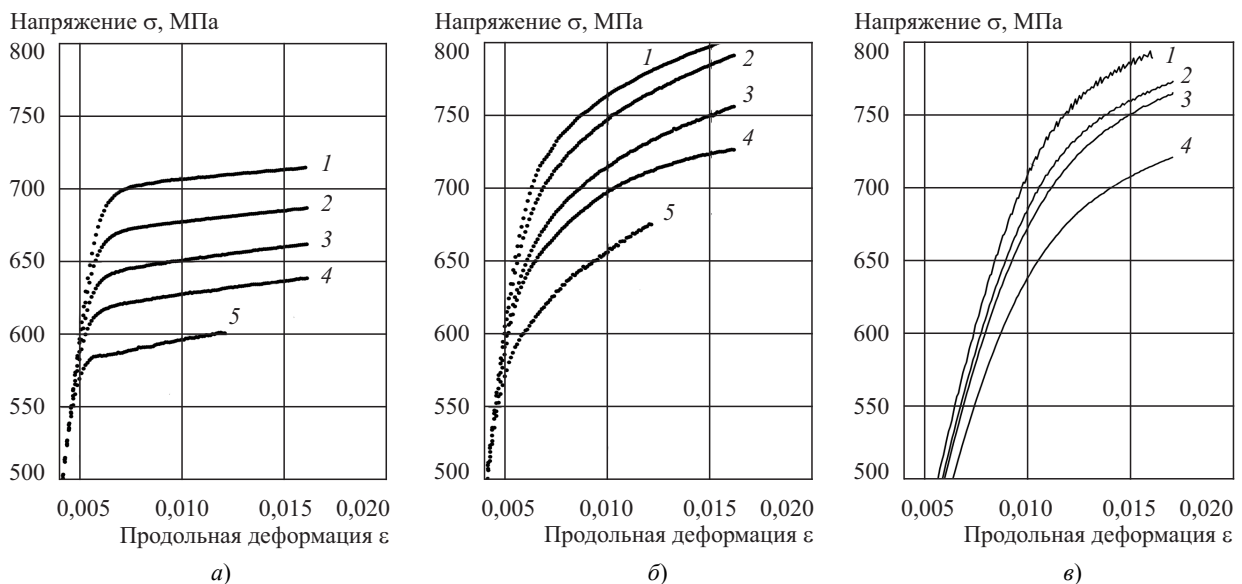
UDC 624.042:669.295.5

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-50-60

У титановых сплавов в эксплуатационных условиях при климатических температурах закон связи между силами и перемещениями может зависеть от времени. Эта зависимость проявляется, в частности, в том, что при постоянной нагрузке деформации не остаются постоянными, а растут со временем и могут достигать недопустимо большой величины, если нагрузка действует достаточно долго. Исследование ползучести, в отличие от упругости и пластичности, предполагает экстраполяцию данных, полученных на образцах в лабораторных условиях, на реальные конструкции, работающие в реальном существенно превосходящем времени. В ГОСТ 3248–81 «Метод испытания на ползучесть» [1] введено понятие условного предела ползучести, который определяется для заданной базы времени

и заданной остаточной деформации (деформации ползучести) в условиях одноосного растяжения.

За последние годы опубликованы работы [2, 3], авторы которых предлагают получать аналитические зависимости ползучести на основании экспериментальных исследований, не требующих столь существенных затрат времени. Крыловским государственным научным центром разработан метод оценки влияния времени на упруго-пластическое деформирование металлических материалов [2], позволяющий, в частности, оценить склонность материала к ползучести. С помощью указанного метода был получен большой объем экспериментальных данных, а также было установлено хорошее соответствие с результатами стандартных испытаний на ползучесть. По сравнению со стандарт-



**Рис. 1.** Диаграммы «напряжение – суммарная деформация» при постоянной скорости суммарной деформации:  $3,33 \cdot 10^{-8}$  (5);  $3,33 \cdot 10^{-7}$  (4);  $3,33 \cdot 10^{-6}$  (3);  $3,33 \cdot 10^{-5}$  (2);  $3,33 \cdot 10^{-4}$  (1) 1/с: а) растяжение в исходном состоянии; б) сжатие в исходном состоянии; в) сжатие после наклепа растяжением  $5 \cdot 10^{-3}$

**Fig. 1.** Diagrams "stress-total strain" at constant rate of total strain:  $3.33 \cdot 10^{-8}$  (5);  $3.33 \cdot 10^{-7}$  (4);  $3.33 \cdot 10^{-6}$  (3);  $3.33 \cdot 10^{-5}$  (2);  $3.33 \cdot 10^{-4}$  (1) 1/s: a) tension in the initial state; b) compression in the initial state; c) compression after work hardening by tension  $5 \cdot 10^{-3}$

ными методами испытаний на ползучесть предлагаемый метод требует существенно меньшего времени, количества образцов и экспериментальных установок. Оценка холодной ползучести производится на основании экспериментальных результатов, полученных в условиях испытаний при постоянной скорости суммарной деформации, а не в условиях ползучести. Используется описание ползучести на основе теории упрочнения [4], в основе которой лежит предположение, что между напряжением  $\sigma(t)$ , остаточной деформацией (деформацией ползучести)  $\varepsilon_{\text{ост}}(t)$  и ее скоростью  $\dot{\varepsilon}_{\text{ост}}(t)$  существует определенная зависимость (в дальнейшем все напряжения даются в МПа, время – в секундах). Указанная зависимость в случае одноосного нагружения принимается в виде [2]:

$$\sigma(t) = A_1 \ln \varepsilon_{\text{ост}}(t) + A_2 + A_3 \ln \dot{\varepsilon}_{\text{ост}}(t). \quad (1)$$

Параметры  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  определяются экспериментально при проведении испытаний в широком диапазоне изменения скорости деформирования.

В данной работе получены экспериментальные данные, характеризующие влияние фактора времени на упруго-пластические свойства титанового сплава в условиях одноосного сжатия, и показано, как проявляется этот фактор в зависимости от знака напряжения.

Испытания проводились на 5 и 2,5-кратных цилиндрических образцах с начальным диаметром рабочей части  $d_0 = 10$  мм на испытательной машине «Инстрон-8804» (Англия) с дискретной записью значений напряжения  $\sigma$  и продольной деформации

$\varepsilon_{\text{сум}}$  на жесткий диск управляющего персонального компьютера. Для измерения продольной деформации  $\varepsilon_{\text{сум}}$  использовался экстензометр фирмы «Инстрон» кат. № 2620-603 с базой измерения 50 и 25 мм и рабочим ходом  $\pm 1$  мм (2 и 4 %). Испытания проводились при постоянной скорости суммарной деформации в диапазоне  $3,33 \cdot 10^{-8} - 3,33 \cdot 10^{-4}$  1/с в условиях одноосного растяжения и одноосного сжатия. Интервал сканирования суммарной деформации  $\varepsilon_{\text{сум}}(t)$  составлял  $1 \cdot 10^{-4} = 0,01$  %, что соответствовало интервалам сканирования по времени  $\Delta t = 3000; 300; 30; 3$  и 0,3 с. Относительная погрешность измерения нагрузки и суммарной деформации не превышала  $\pm 0,5$  % от измеряемого значения параметра. Остаточная деформация в каждой точке сканирования определялась по формуле  $\varepsilon_{\text{ост}}(t) = \varepsilon_{\text{сум}}(t) - \sigma(t)/E$  ( $E$  – модуль нормальной упругости).

На рис. 1а, б приведены диаграммы «напряжение – суммарная деформация», полученные в условиях одноосного растяжения и одноосного сжатия. Качественно диаграммы отличаются друг от друга: при сжатии имеет место значительное упрочнение.

В табл. 1 приведены значения параметров  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , полученные при одноосном растяжении и сжатии для двух диапазонов изменения остаточной деформации:  $1 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$ .

Будем использовать соотношение (1) как дифференциальное уравнение относительно функции  $\varepsilon_{\text{ост}}(t)$  применительно к различным видам нагружения.

**Таблица 1.** Значения параметров  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , полученные при одноосном растяжении и сжатии для двух диапазонов изменения остаточной деформации

**Table 1.** Parameters  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , obtained under uniaxial tension and compression for two ranges of residual strain variations

Вид напряженного состояния	Диапазон остаточной деформации	$A_1$ , МПа	$A_2$ , МПа	$A_3$ , МПа	$m$	$\gamma$ , МПа
Растяжение в исходном состоянии	$1 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	11,23	864,65	11,54	0,507	856,81
	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$	9,17	848,30	11,50	0,556	841,56
Сжатие в исходном состоянии	$1 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	28,95	1009,2	11,07	0,277	994,97
	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$	35,66	1064,0	11,55	0,245	1047,7
Сжатие после наклепа растяжением $\varepsilon_{\text{ост}} = 0,5$ %	$1 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	140,5	1502	10,0	0,0664	1425
	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$	155,7	1641	11,5	0,0688	1610

В условиях ползучести при постоянном напряжении  $\sigma(t) = \sigma_0$  решение дифференциального уравнения (1) относительно функции  $\epsilon_{ост}(t)$  записывается в виде

$$\epsilon_{ост}(t) = \left( t \exp \frac{\sigma_0 - \gamma}{A_3} \right)^m, \quad (2)$$

где  $m = A_3 / (A_1 + A_3)$ ;  $\gamma = A_2 + A_3 \ln m$ . Значения параметров  $m$  и  $\gamma$  при растяжении и сжатии также приведены в табл. 1 для двух диапазонов изменения остаточной деформации (деформации ползучести).

Скорость ползучести определяется зависимостью

$$\dot{\epsilon}_{ост}(t) = \frac{m \exp \frac{m(\sigma_0 - \gamma)}{A_3}}{t^{1-m}}$$

или

$$\dot{\epsilon}_{ост}(t) = \frac{m}{t} \epsilon_{ост}(t). \quad (3)$$

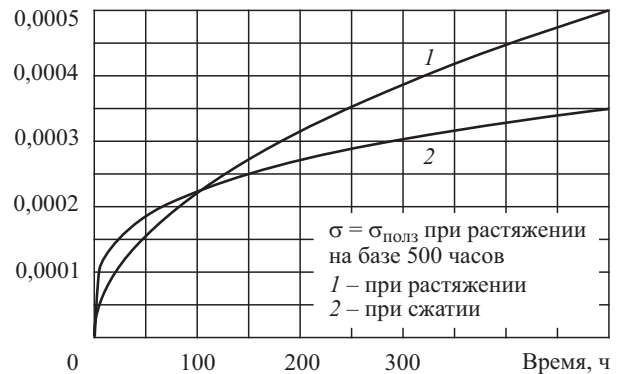
Предел ползучести определяется по формуле

$$\sigma_{полз} = \gamma + (A_1 + A_3) \ln \epsilon_{ост1} - A_3 \ln t_1, \quad (4)$$

где  $\epsilon_{ост1}$  и  $t_1$  – базовая деформация ползучести и базовое время при определении предела ползучести.

Приведенные формулы должны использоваться в том диапазоне остаточной деформации, который приведен в табл. 1. Как следует из соотноше-

Деформация ползучести



**Рис. 2.** Расчетные кривые ползучести при напряжении, равном пределу ползучести при растяжении на базе 0,05 % деформации ползучести за 500 ч

**Fig. 2.** Calculated creep curves at critical creep stress under tension based on 0.05 % creep strain over 500 hours

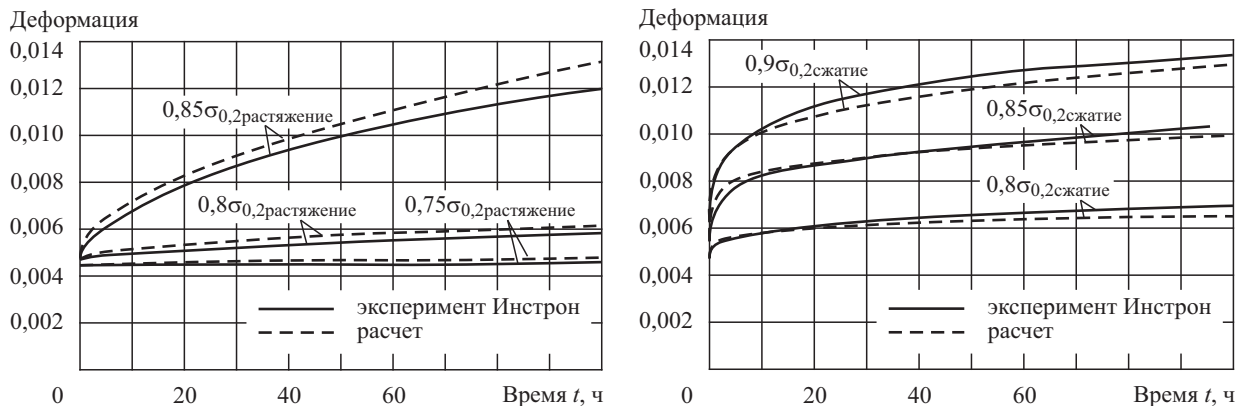
ния (1), при постоянной функции  $\sigma = \sigma(t)$  скорость остаточной деформации  $\dot{\epsilon}_{ост}(t)$  не постоянна, т.е. предлагаемые соотношения описывают процесс неустановившийся ползучести. Можно предложить обобщение соотношения (1), позволяющее описать переход к установившейся ползучести, но эта задача в данной работе не ставилась.

В табл. 2 приведены значения пределов ползучести при растяжении и при сжатии, вычисленные по формуле (4), и их отношения к соответствующим

**Таблица 2.** Значения пределов ползучести при растяжении и при сжатии, вычисленные по формуле (4), и их отношения к соответствующим условным пределам текучести

**Table 2.** Creep stresses at tension and compression calculated from eq. (4) and their comparison with offset yield stress

Допуск на остаточную деформацию $\epsilon_{ост}$ , %	Временная база $t$ , час	Условный предел ползучести $\sigma_{полз}$ , МПа	$\sigma_{полз} / \sigma_{0,2}$ растяжение	Условный предел ползучести $\sigma_{полз}$ , МПа	$\sigma_{полз} / \sigma_{0,2}$ сжатие
		растяжение		сжатие	
0,05	500	517	0,74	531	0,71
	8760 (1 год)	484	0,69	500	0,67
0,2	500	549	0,78	587	0,79
	8760 (1 год)	516	0,74	555	0,75
0,5	500	566	0,81	631	0,85
	8760 (1 год)	534	0,76	598	0,80
1,0	500	581	0,83	664	0,89
	8760 (1 год)	548	0,78	631	0,85



**Рис. 3.** Сопоставление расчетных (формула (2), табл. 1) и экспериментальных кривых ползучести при различных уровнях напряжения в условиях одноосного растяжения и сжатия

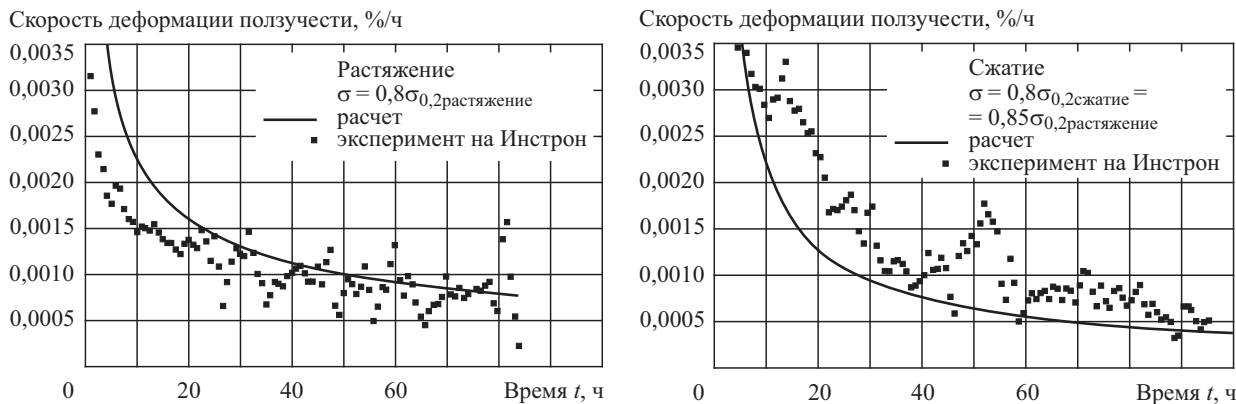
**Fig. 3.** Comparison of calculated (eq. (2), table 1) and experimental creep curves at various stress levels under uniaxial tension and compression

щим условным пределами текучести. Как следует из рис. 1 и табл. 1 и 2, свойства сплава при растяжении и сжатии существенно различаются. В частности, на рис. 2 приведены расчетные кривые ползучести при напряжении, равном пределу ползучести при растяжении на базе 0,05 % деформации ползучести при продолжительности 500 ч. Видно, что деформация ползучести при сжатии существенно меньше, т.е. при использовании данных, полученных при растяжении, для оценки ползучести при сжатии имеет место ошибка в безопасную сторону.

Заметим, что, как следует из формулы (3), скорость ползучести при заданных значениях деформации ползучести и времени пропорциональна ве-

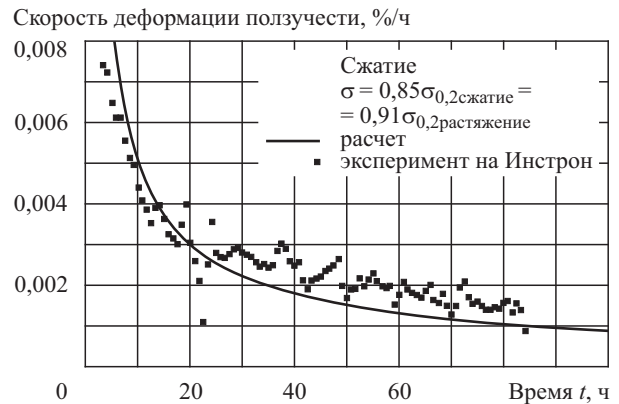
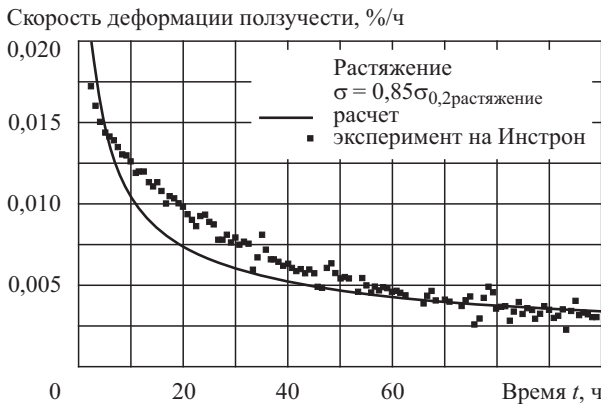
личине параметра  $m$ . Для рассматриваемого сплава это означает, что скорость ползучести при растяжении примерно вдвое превосходит скорость ползучести при сжатии.

На рис. 3–6 приведены расчетные и экспериментальные кривые, описывающие ползучесть сплава при растяжении и сжатии при различных уровнях напряжения, взятых в долях от пределов текучести при одноосном растяжении и одноосном сжатии. Испытания проводились на 5 и 2,5-кратных цилиндрических образцах с начальным диаметром рабочей части  $d_0 = 10$  мм на испытательной машине «Инстрон-8804» (Англия) с записью диаграмм «суммарная деформация  $\epsilon_{\text{сум}}$  – время  $t$ ». Для измерения продольной деформации  $\epsilon$



**Рис. 4.** Сопоставление расчетных (формула (3), табл. 1) и экспериментальных данных по скорости ползучести при различных уровнях напряжения в условиях одноосного растяжения и сжатия

**Fig. 4.** Comparison of calculated (eq. (3), table 1) and experimental data on creep rate at various stress levels under uniaxial tension and compression



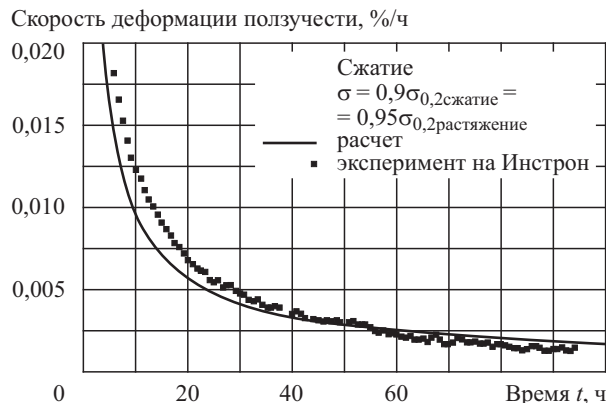
**Рис. 5.** Сопоставление расчетных (формула (3), табл. 1) и экспериментальных данных по скорости ползучести при различных уровнях напряжения в условиях одноосного растяжения и сжатия

**Fig. 5.** Comparison of calculated (eq. (3), table 1) and experimental data on creep rate at various stress levels under uniaxial tension and compression

использовался экстензометр фирмы «Инстрон» кат. № 2620-603 с базой измерения 50 и 25 мм и рабочим ходом  $\pm 1$  мм (2 и 4 %). Время испытаний составило 100 ч.

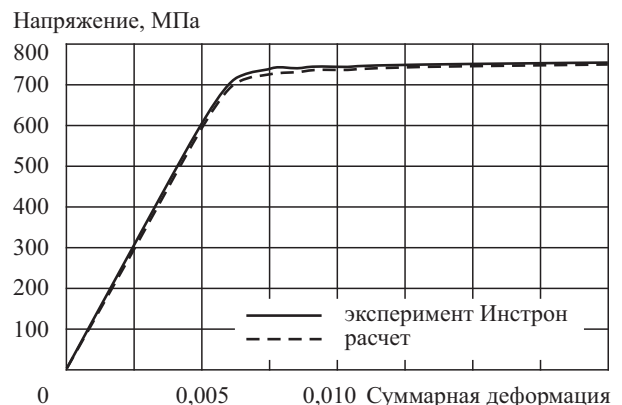
Данные рис. 3–6 свидетельствуют о том, что предложенный метод расчета ползучести хорошо согласуется с экспериментальными данными. Разброс экспериментальных данных, относящихся к скорости ползучести, уменьшается с ростом деформации ползучести и соответствующим уменьшением влияния погрешности измерений.

В заключение этого раздела приведем расчет диаграммы «напряжение – суммарная деформация», полученной при скорости суммарной деформации  $3,33 \cdot 10^{-3}$  1/с, т.е. при скорости на порядок большей стандартной, с использованием параметров  $A_1, A_2, A_3$ , приведенных в табл. 1. Формулы для расчета приведены в [2]. Время испытаний составило 6 с. Результаты расчета, хорошо согласующиеся с экспериментом, представлены на рис. 7. Напомним, что эти экспериментальные данные не были использованы при определении пара-



**Рис. 6.** Сопоставление расчетных (формула (3), табл. 1) и экспериментальных данных по скорости ползучести при различных уровнях напряжения в условиях одноосного сжатия

**Fig. 6.** Comparison of calculated (eq. (3), table 1) and experimental data on creep rate at various stress levels under uniaxial compression



**Рис. 7.** Экспериментальная и расчетная диаграммы «напряжение – суммарная деформация», полученные при скорости суммарной деформации  $3,33 \cdot 10^{-3}$  1/с

**Fig. 7.** Diagrams "stress-total strain" obtained by calculation and experiments at the total strain rate  $3.33 \cdot 10^{-3}$  1/s

метров  $A_1, A_2, A_3$ , использованных в расчете. Исследование при бóльших скоростях деформации не входило в задачу данной работы.

Рассмотрим влияние на ползучесть предварительного деформирования как одного знака (наклеп, рис. 8), так и противоположного знака (аналог эффекта Баушингера, рис. 11).

Рассматривается схема нагружения, представленная на рис. 8а. Наклеп производится в течение времени  $t = t_{\text{накл}}$ , и остаточная деформация составляет величину  $\varepsilon_{\text{ост}} = \varepsilon_{\text{накл}}$ . Кривая ползучести, соответствующая второму участку нагружения, получена из дифференциального уравнения (1) при указанных начальных условиях, и записывается в виде

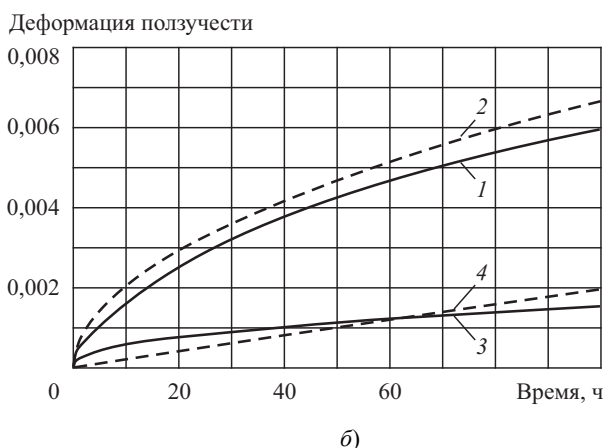
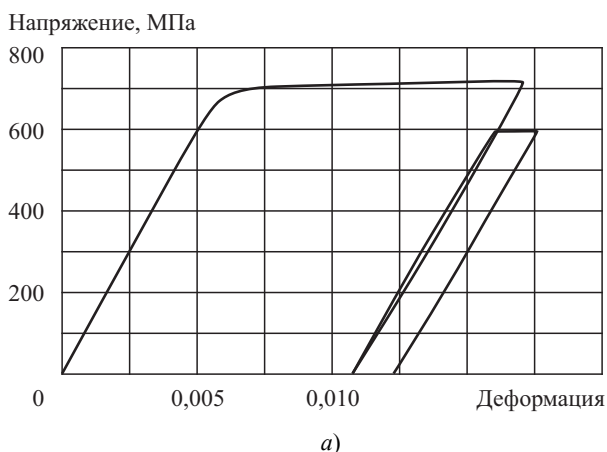
$$\varepsilon_{\text{ост}} - \varepsilon_{\text{накл}} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_{\text{накл}}^m} + (t - t_{\text{накл}}) \exp \frac{\sigma_0 - \gamma}{A_3} \right]^m - \varepsilon_{\text{накл}} \quad (5)$$

В рассмотренном случае образец получил предварительную остаточную деформацию растяжения, равную  $\varepsilon_{\text{накл}} = 0,0108$ . Далее образец был нагружен до напряжения  $\sigma_0$ , равного 0,85 предела текучести материала при растяжении, и под этой нагрузкой находился в течение 100 ч. При расчете кривых ползучести использовались значения параметров  $m, A_3$  и  $\gamma$ , приведенные в табл. 1. Как видно из рис. 8б, наклеп и связанное с ним упрочнение материала

замедлили процесс ползучести, что согласуется с приведенными данными расчета.

В этом разделе рассмотрено также влияние скорости предварительного наклепа растяжением на упруго-пластические свойства сплава. Для проведения исследования были использованы образцы, на которых были получены диаграммы «напряжение – суммарная деформация», приведенные на рис. 1а. Как видно из этого рисунка, напряжение, достигнутое на каждом образце к моменту начала разгрузки, существенно зависит от скорости деформирования и изменяется в диапазоне 610–720 МПа. После разгрузки эти образцы были растянуты с одной и той же стандартной скоростью суммарной деформации  $3,33 \cdot 10^{-4}$  1/с. Полученные диаграммы, представленные на рис. 9, полностью совпадают. Таким образом, оказалось, что влияние наклепа определяется величиной остаточной деформации и не зависит от скорости, с которой этот наклеп создавался, и от напряжения, которое имело место в момент разгрузки.

Совершенно другая картина имеет место при предварительном пластическом деформировании нагрузкой противоположного знака. На рис. 10 представлены экспериментальные результаты исследования эффекта Баушингера методом зондирования сжатием и растяжением. Через заданные интервалы остаточной деформации образец разгружа-



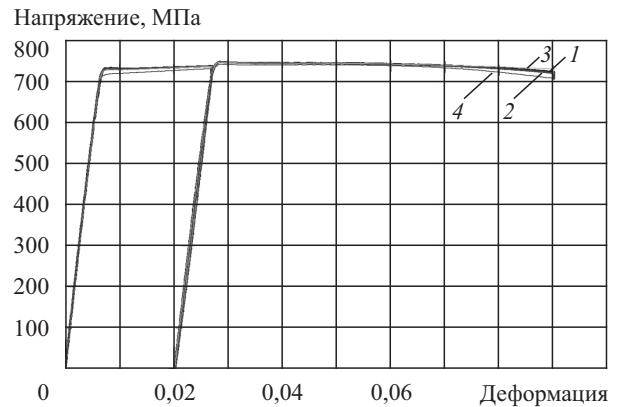
**Рис. 8.** Влияние на ползучесть предварительного деформирования: а) схема нагружения образца; б) рост во времени деформации ползучести при нагрузке 0,85 предела текучести; 1 – испытание на ползучесть материала в исходном состоянии; 2 – расчет деформации ползучести при растяжении (формула 2); 3 – испытание на ползучесть материала после наклепа растяжением; 4 – расчет деформации ползучести после наклепа растяжением (формула 5)

**Fig. 8.** Effect of preliminary strain on creep behavior: а) specimen loading setup; б) time history of creep strain growth under loading at 0.85 yield stress level; 1 – creep test (initial state); 2 – calculation of creep strain under tension (eq. 2); 3 – creep tests after tensile cold working; 4 – calculation of creep strain after tensile cold working (eq. 5)

ется и получает нагрузку противоположного знака до достижения остаточной деформации 0,2 %, после чего производится разгрузка и последующее прямое нагружение (метод зондирования). На рисунках пунктиром показаны стандартные диаграммы прямого деформирования, свидетельствующие о том, что зондирование не отражается на поведении материала в направлении прямого нагружения. Упруго-пластические свойства материала в противоположном направлении после наклепа существенно изменяются: материал разупрочняется. Далее приведены результаты исследования влияния наклепа на сопротивляемость материала ползучести в направлении, противоположном наклепу (аналог эффекта Баушингера).

Схема деформирования приведена на рис. 11а. Образец получил предварительную пластическую деформацию растяжением 0,006, затем был нагружен сжатием до 0,95 предела текучести материала при растяжении, и под этой нагрузкой находился в течение 100 ч. (рис. 11б). Видно, что после нагружения противоположного знака существенно увеличилась склонность материала к ползучести. Предложенные методы расчета с использованием параметров  $A_1, A_2, A_3$ , полученных для материала в исходном состоянии, не могут быть применены к рассмотренному случаю, т.к. существенно изменились как упруго-пластические свойства, так и склонность к ползучести полученного материала.

Рассмотрим ползучесть при сжатии материала, полученного после предварительного наклепа растя-



**Рис. 9.** Диаграммы «напряжение – суммарная деформация», полученные при стандартной скорости деформирования  $3,33 \cdot 10^{-4}$  1/с после одинакового наклепа растяжением 0,01 при скоростях деформирования  $3,33 \cdot 10^{-8}$  (4);  $3,33 \cdot 10^{-7}$  (3);  $3,33 \cdot 10^{-6}$  (2);  $3,33 \cdot 10^{-5}$  1/с (1)

**Fig. 9.** Diagrams "stress-total strain" obtained at standard strain rate  $3,33 \cdot 10^{-4}$  1/s after equal tensile cold-working of 0.01 at strain rates  $3,33 \cdot 10^{-8}$  (4);  $3,33 \cdot 10^{-7}$  (3);  $3,33 \cdot 10^{-6}$  (2);  $3,33 \cdot 10^{-5}$  1/s (1)

жением  $5 \cdot 10^{-3}$ . Выполним исследование влияния скорости деформирования на свойства этого материала в условиях сжатия. Пять образцов получили наклеп растяжением  $5 \cdot 10^{-3}$  и затем были испытаны на сжатие с постоянными скоростями суммарной деформации  $3,33 \cdot 10^{-7}$ ,  $3,33 \cdot 10^{-6}$ ,  $3,33 \cdot 10^{-5}$  и  $3,33 \cdot 10^{-4}$  1/с. Полученные диаграммы приведены на рис. 1в, 12.



а)



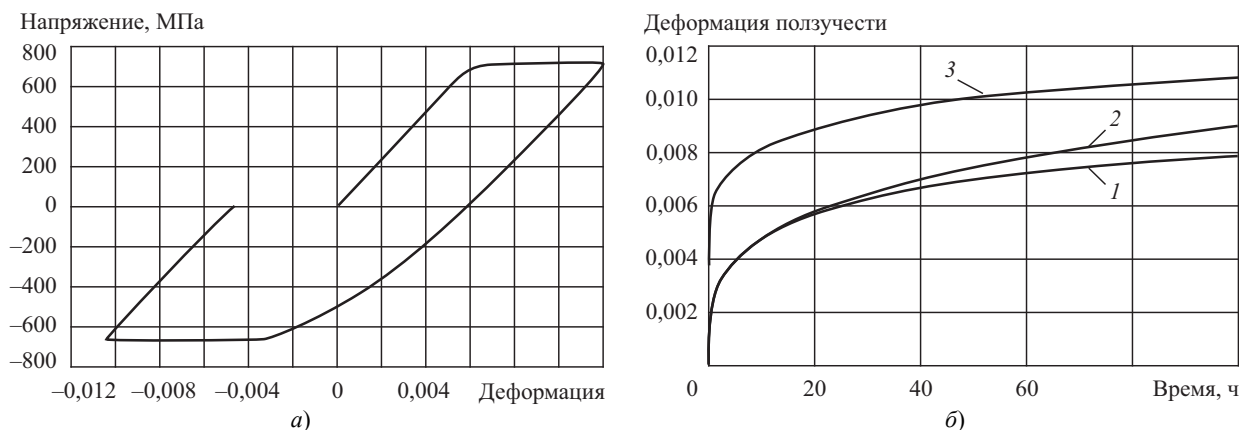
б)

**Рис. 10.** Экспериментальное исследование эффекта Баушингера методом зондирования:

а) зондирование сжатием; б) зондирование растяжением. Испытания проведены при скорости суммарной деформации  $3,33 \cdot 10^{-4}$  1/с

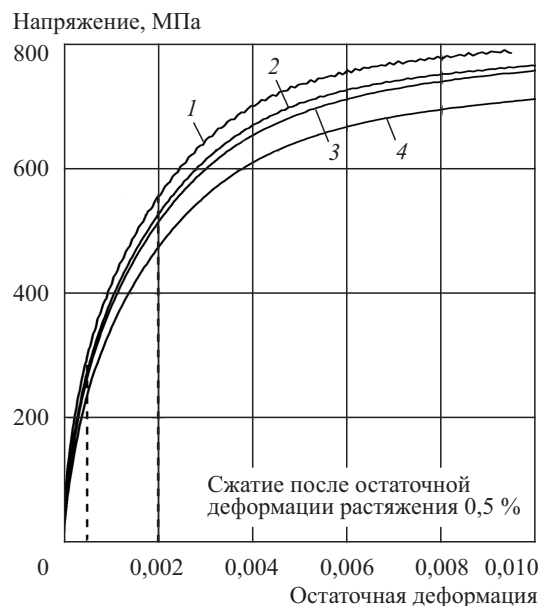
**Fig. 10.** Experimental study of Bauschinger effect: а) compression sounding; б) tension sounding. Rate of total strain  $3,33 \cdot 10^{-4}$  1/с





**Рис. 11.** Предварительное пластическое деформирование нагрузкой противоположного знака: а) схема нагружения образца; б) кривые ползучести при нагрузке 0,95 предела текучести (представлена абсолютная величина деформации ползучести при сжатии); 1 – экспериментальная кривая ползучести при сжатии материала в исходном состоянии; 2 – расчетная кривая ползучести при сжатии материала в исходном состоянии; 3 – экспериментальная кривая ползучести при сжатии материала после наклепа растяжением

**Fig. 11.** Preliminary plastic strain of reverse sign: a) specimen loading setup; b) creep curves obtained under loading at 0.95 yield stress level (absolute deformation under compression); 1 – experimental creep curve under compression (initial state of material); 2 – calculated creep curve under compression (initial state of material); 3 – experimental creep curve under compression after tensile cold working



**Рис. 12.** Диаграммы «напряжение – остаточная деформация» при скоростях суммарной деформации  $3,33 \cdot 10^{-7}$  (4);  $3,33 \cdot 10^{-6}$  (3);  $3,33 \cdot 10^{-5}$  (2);  $3,33 \cdot 10^{-4}$  1/с (1) в условиях сжатия после предварительного наклепа растяжением  $5 \cdot 10^{-3}$

**Fig. 12.** Diagrams "stress-total strain" obtained at total strain rates  $3.33 \cdot 10^{-7}$  (4);  $3.33 \cdot 10^{-6}$  (3);  $3.33 \cdot 10^{-5}$  (2);  $3.33 \cdot 10^{-4}$  1/s under compression after tensile cold working  $5 \cdot 10^{-3}$

Как видно из рис. 1в, диаграммы деформирования материала при сжатии после наклепа растяжением качественно отличаются от диаграмм, полученных на материале в исходном состоянии (рис. 1б). На диаграммах отсутствует линейный участок; стандартный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  равен 557 МПа; на рис. 12 пунктиром показаны значения напряжений, соответствующие остаточным деформациям  $5 \cdot 10^{-4}$  и  $2 \cdot 10^{-3}$ . В табл. 1 приведены значения параметров  $A_1, A_2, A_3$ , полученные на основании диаграмм, представленных на рис. 1в; соответствующее значение условного предела ползучести  $\sigma_{500ч}^{0,05\%}$  составляет 187 МПа (условный предел ползучести при сжатии в исходном состоянии – 531 МПа). С увеличением допуска на деформацию ползучести существенное упрочнение приводит к увеличению предела ползучести и снижению влияния наклепа.

При проведении экспериментальных исследований на материале, у которого остаточные деформации имеют место при низких значениях напряжений, необходимо четко определить понятие мгновенной деформации ползучести. В книге Ю.Н. Работнова [4] отмечается, что определение начальной деформации ползучести встречает известные трудности, связанные с тем, что эта начальная деформация зависит от способа приложения нагрузки. Чтобы сделать условия более

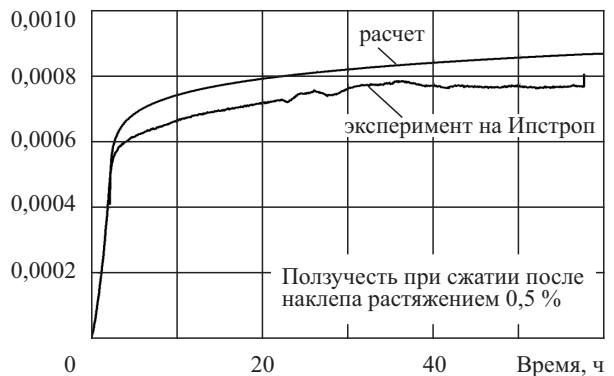
определенными, в [4], например, предлагается перед испытанием на ползучесть при постоянной нагрузке нагружать образец с постоянной, строго фиксированной скоростью увеличения напряжения. Ниже представлены экспериментальные и расчетные кривые ползучести, полученные при сжатии напряжением 260 МПа на материале после наклепа растяжением  $5 \cdot 10^{-3}$ . Для напряжения 260 МПа при скоростях суммарной деформации  $3,33 \cdot 10^{-7}$ ;  $3,33 \cdot 10^{-6}$ ;  $3,33 \cdot 10^{-5}$ ;  $3,33 \cdot 10^{-4}$  1/с начальная остаточная деформация составляет, соответственно,  $5,9 \cdot 10^{-4}$ ;  $4,8 \cdot 10^{-4}$ ;  $4,6 \cdot 10^{-4}$ ;  $3,9 \cdot 10^{-4}$ , т.е. разница в величине мгновенной деформации ползучести имеет порядок  $2 \cdot 10^{-4}$ . Таким образом, при сопоставлении эксперимента и расчета должны быть использованы одинаковые соответствующие мгновенные деформации ползучести.

Рис. 13 демонстрирует наличие эффекта Баушингера в условиях ползучести. Действительно, при напряжении 260 МПа на сплаве в исходном состоянии ползучести не наблюдается. Однако наклеп напряжением противоположного знака существенно изменяет свойства материала, снижая его сопротивление ползучести. В табл. 1 приведены значения параметров  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , полученные на материале при сжатии после наклепа растяжением. Расчет ползучести с использованием этих параметров дает хорошее совпадение с полученными экспериментальными данными.

Проблема расчетного описания разгрузки в условиях ползучести представляет особый интерес и не отражена в научной литературе. Напомним, что при рассмотрении упруго-пластического деформирования используется закон Герстнера [5], согласно которому при уменьшении нагрузки зависимость между напряжением и деформацией предполагается линейной. Очевидно, что скорость разгрузки никак не оговаривается. Такой подход при исследовании ползучести не может быть принят, т.к. при медленной разгрузке в материале наряду с упругой разгрузкой будет присутствовать эффект ползучести. Это обстоятельство, в частности, необходимо учитывать при исследовании ползучести при изгибе, т.к. в процессе ползучести в условиях изгиба происходит перераспределение напряжений по поперечному сечению пластины и уменьшение напряжения на поверхности полосы, т.е. процесс ползучести происходит в условиях медленного снижения напряжения. Некоторые результаты исследования ползучести в условиях чистого изгиба представлены в [6].

Если предположить возможность использования дифференциального уравнения (1) в случае

Деформация ползучести



**Рис. 13.** Кривые ползучести при сжатии 260 МПа. Остаточная деформация отсчитывается от начала нагружения со скоростью суммарной деформации  $3,33 \cdot 10^{-7}$  1/с

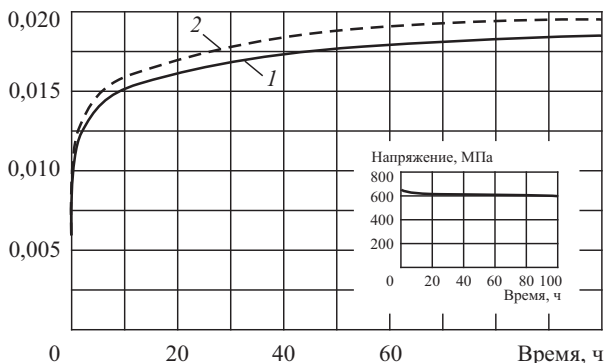
**Fig. 13.** Creep curves under compression of 260 MPa. Residual strain calculated with reference to the starting point of loading at the total strain rate of  $3,33 \cdot 10^{-7}$  1/s

убывающей функции  $\sigma = \sigma(t)$ , то его решение записывается в виде

$$\varepsilon_{\text{ост}}(t) = \left[ \int_0^t \exp \frac{\sigma(t) - \gamma}{A_3} dt \right]^m. \quad (6)$$

Исследование ползучести в условиях разгрузки при одноосном растяжении образца было прове-

Деформация



**Рис. 14.** Рост суммарной деформации во времени при снижающемся напряжении растяжения: 1 – экспериментальная кривая ползучести; 2 – расчетная кривая ползучести, полученная с использованием формулы (6)

**Fig. 14.** Growth of total strain in time at tensile stress reduction: 1 – experimental creep curve; 2 – creep curve obtained by calculation from eq. (6)

дено с использованием изменения напряжения  $\sigma = \sigma(t)$ , полученного при рассмотрении чистого изгиба полосы, изложенного в [6]. В начальный момент напряжение на поверхности пластины составляло  $0,95\sigma_{0,2}$ , затем в течение 100 ч уменьшалось до  $0,85\sigma_{0,2}$ . График зависимости  $\sigma = \sigma(t)$  приведен внизу справа на рис. 14.

На рис. 14 приведены расчетные и экспериментальные кривые ползучести для этого закона изменения напряжения, которые хорошо согласуются между собой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при исследовании ползучести использование закона Герстнера возможно только при достаточно высокой скорости разгрузки. При низкой скорости разгрузки и достаточно больших напряжениях имеет место наложение двух процессов – упругой разгрузки и продолжения ползучести, и, как показал эксперимент, существенную роль играет процесс ползучести. Этот вопрос нуждается в исследовании.

## Библиографический список

### References

- ГОСТ 3248-81. Металлы. Метод испытания на ползучесть. [GOST 3248-81. Metals. Creep tests (in Russian)].
- Михайлов Э.Ю., Нигматуллин В.И., Палий О.М., Рыбакина О.Г. Ускоренные расчетно-экспериментальные методы оценки холодной ползучести титановых сплавов // Труды Крыловского научного центра. 2016. Вып. 93(377). С. 7–16. [Mikhailov E.Yu., Nigmatullin V.I., Paliy O.M., Rybakina O.G. Calculation-experimental methods for prompt assessment of titanium alloy creep under cold working. Transactions of Krylov State Research Centre. 2016. Issue 93(377). P. 7–16. (in Russian)].
- Neeraj T., Hou D.-H., Daehn G.S., Mills M.J. Phenomenological and microstructural analysis of room temperature creep in titanium alloys // Acta mater. 2000. № 48. P. 1225–1238.
- Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. [Rabotnov Yu.N. Creep of structural parts. M. Nauka, 1966. (in Russian)].
- Bell J.F. Experimental Foundations of Solid Mechanics. Part I. Nauka, 1984 (Russian translation).
- Нигматуллин В.И., Палий О.М., Рыбакина О.Г., Строганова О.А. Расчетно-экспериментальное исследование холодной ползучести титанового сплава в условиях чистого изгиба // Конференция по строительной механике корабля, посвященная памяти профессора В.А. Постнова и 90-летию со дня его рождения. 13–14 декабря 2017. Тез. докл. С. 69–70. [Nigmatullin V.I., Paliy O.M., Rybakina O.G., Stroganova O.A. Calculation-experimental investigation of titanium alloy creep under pure bending. Conference on ship structural mechanics dedicated to the memory of professor V.A. Postnov and 90<sup>th</sup> anniversary of his birthday. 13–14 December 2017. Paper summary. P. 69–70. (in Russian)].

### Сведения об авторах

Михайлов Эрвин Юрьевич, инженер 1 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (904) 512-10-11. E-mail: rtt1983@mail.ru.

Нигматуллин Владимир Игоревич, к.т.н., научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (904) 607-66-57. E-mail: vertigobos@yandex.ru.

Рыбакина Оксана Григорьевна, к.т.н., старший научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (950) 037-18-08. E-mail: rybakina37@mail.ru.

### About the authors

Ervin Yu. Mikhailov, Engineer 1 category, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: +7 (904) 512-10-11. E-mail: rtt1983@mail.ru.

Vladimir I. Nigmatullin, Cand. Sc., Research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: +7 (904) 607-66-57. E-mail: vertigobos@yandex.ru.

Oksana G. Rybakina, Cand. Sc., Senior Research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: +7 (950) 037-18-08. E-mail: rybakina37@mail.ru.

Поступила / Received: 27.03.18  
Принята в печать / Accepted: 22.08.18  
© Коллектив авторов, 2018