DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-22-28
УДК 669.295.5:539.376

В.И. Нигматуллин, О.Г. Рыбакина, О.А. Строгонова
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОДНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА В УСЛОВИЯХ ЧИСТОГО ИЗГИБА

Объект и цель научной работы. Исследован чистый изгиб полосы титанового сплава с различающимися свойствами при растяжении и сжатии в условиях холодной ползучести. Теоретически и экспериментально исследовано влияние пластического деформирования противоположного знака на последующий процесс ползучести.

Материалы и методы. Для описания ползучести использован предложенный ранее метод, основанный на испытаниях образцов в условиях постоянной скорости суммарной деформации в широком диапазоне (5 порядков). Эксперимент проводился на испытательных машинах серии «Инстрон-8800».

Основные результаты. Полоса, изготовленная из титанового сплава, деформировалась в условиях чистого изгиба. Регистрировались момент и деформация растяжения и сжатия на ее поверхностях. Полученные данные позволили построить диаграммы «напряжение – деформация», которые совпали с независимо построенными диаграммами при одноосном растяжении и одноосном сжатии. Расчетные и экспериментальные исследования проведены в условиях холодной ползучести. Для каждого заданного момента времени численно определены распределения деформаций и напряжений по толщине полосы. Показано, что в процессе ползучести происходит перераспределение напряжений по сечению полосы, напряжение у поверхности полосы снижается, и имеет место замедление процесса ползучести. Исследовано влияние предварительного изгиба на последующую ползучесть перевернутой полосы и показано увеличение деформаций ползучести по сравнению со сплавом в исходном состоянии (аналог эффекта Баушингера).

Заключение. Полученные результаты позволят учитывать холодную ползучесть титанового сплава при расчетах конструкций глубоководной техники.

Ключевые слова: глубоководная техника, холодная ползучесть, титановый сплав, деформация, растяжение, изгиб.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-22-28
UDC 669.295.5:539.376

V. Nigmatullin, O. Rybakina, O. Strogonova
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

AN EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF A TITANIUM ALLOY COLD CREEP IN THE PURE BENDING CONDITIONS

Object and purpose of research. This paper studies pure bending of titanium alloy strap with different properties in tension and compression under cold creep conditions. The effect of opposite-sign plastic strain on subsequent creep process is studied both analytically and experimentally.

Materials and methods. Creep is described with the previously method based on the tests of samples performed at constant total strain rate in a wide range (5 orders of magnitude). The experiment was performed at *Instron 8800*-series test machines.

Main results. Titanium alloy strap was subjected to pure bending. The bending moment and tension-compression strains on its surfaces were recorded. These data made it possible to obtain stress-strain diagrams for this material that coincided with the

Для цитирования: Нигматуллин В.И., Рыбакина О.Г., Строгонова О.А. Расчетно-экспериментальное исследование холодной ползучести титанового сплава в условиях чистого изгиба. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 3(389): 22–28.

For citations: Nigmatullin V., Rybakina O., Strogonova O. An experimental and analytical study of a titanium alloy cold creep in the pure bending conditions. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 3(389): 22–28 (in Russian).

diagrams obtained independently for uniaxial tension and uniaxial compression. Analytical and experimental studies were performed in cold-creep conditions. Stress and strain distributions in the strap thickness were calculated for each moment of time. It has been shown that the creep is accompanied by stress redistribution in the strap thickness: the stresses near the surfaces relax, as a result the creep decelerates. The effect of pre-bending on subsequent creep of the strap turned upside down has also studied: it turned out that the creep strains in this case are greater than for the alloy in the initial state (this phenomenon is similar to Bauschinger effect).

Conclusion. These results will enable structural calculations of titanium-alloy deepwater submersibles taking cold creep into account.

Keywords: deepwater submersibles, cold creep, titanium alloy, strain, tension, bending.
Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Постановка задачи

Formulation of task

В работе [1] представлено решение задачи о чистом изгибе балки в условиях упруго-пластического деформирования, которое может быть использовано для материала с различающимися свойствами при одноосном растяжении и одноосном сжатии. Это решение позволило по результатам испытаний на изгиб восстановить упруго-пластические свойства материала при одноосном растяжении и одноосном сжатии. В [2] та же задача решена для случая полосы в условиях плоской деформации с использованием условия пластичности Мизеса, при одинаковых свойствах материала, при растяжении и сжатии. В [3] дано приближенное решение задачи неустановившейся ползучести при изгибе. В [4] изучено влияние истории нагружения на ползучесть титанового сплава в условиях однородного напряженного состояния. В настоящей работе исследован чистый изгиб полосы в условиях холодной ползучести с использованием параметров материала, экспериментально полученных в широком диапазоне скоростей остаточной деформации, дан расчет кривых ползучести, представлены результаты эксперимента и проведено их сопоставление.

Построение диаграммы «напряжение – деформация» по результатам испытаний в условиях чистого изгиба

Stress-strain diagram with pure-bending test data

В работе описаны испытания образцов типа «балка-полоска» с размерами 10×40×280 мм на четырехточечный (чистый) изгиб. Образцы изготовлены из титанового сплава. Эксперименты проводились на универсальной сервогидравлической испытательной машине с процессорным управлением «Инстрон-8803». На рис. 1 показано приспособление для испытаний.

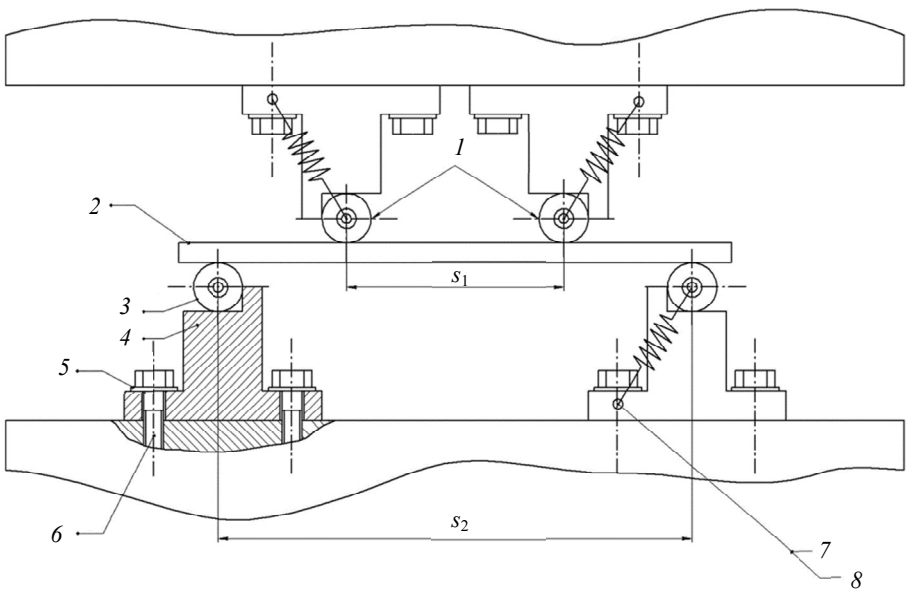


Рис. 1. Приспособление для испытаний призматических образцов по схеме четырехточечного (чистого) изгиба;
S_1 = 110 мм; S_2 = 240 мм;
1 – нагружающие ролики;
2 – образец;
3 – опорные ролики;
4 – корпус опоры;
5 – шайба; *6* – болт;
7 – винт; *8* – пружина

Fig. 1. Tool for four-point (pure) bending tests of prismatic samples: S_1 = 110 mm; S_2 = 240 mm;
1 – loading rollers; *2* – sample; *3* – bearing rollers; *4* – body of support; *5* – washer; *6* – bolt; *7* – screw; *8* – spring

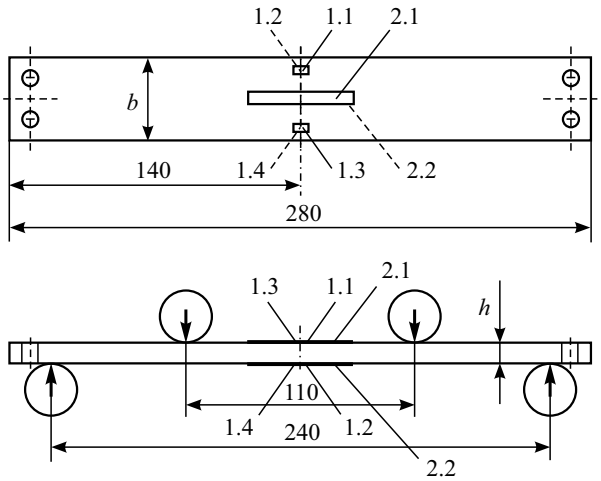


Рис. 2. Схема расположения тензорезисторов и экстензометров на образцах

Fig. 2. Locations of strain gauges and extensometers on the samples

На каждый образец наклеены 4 тензорезистора (2 – для измерения фибровой деформации растяжения и 2 – для измерения фибровой деформации сжатия) типа 1-LY15-6/120 фирмы HBM (Германия) с базой измерения 6 мм, сопротивлением 120 Ом и коэффициентом тензочувствительности 2,08. Схема расположения тензорезисторов на образце показана на рис. 2. Тензоизмерения проводились с помощью 48-канальной измерительной системы MGCPlus (Германия). Максимальная абсолютная погрешность измерения деформации – $1 \cdot 10^{-4}$. Также для сопоставления устанавливались экстензометр Epsilon 3542-050M-005-LHT с базой 50 мм и ходом ±2,5 мм (для измерения фибровой деформации растяжения) и экстензометр Epsilon 3542-050M-020-LHT с базой 50 мм и ходом (+10 мм, –5 мм) (для измерения фибровой деформации сжатия). В табл. 1 приведены номера тензорезисторов и экстензометров для измерения фибровой деформации растяжения и сжатия, соответственно. Использовались средние значения показаний двух тензорезисторов, установленных на растянутой стороне образца, и двух тензорезисторов, установленных на сжатой стороне образца.

Деформирование производилось со скоростью перемещения плунжера 2,2 мм/мин. В процессе испытаний регистрировались значения нагрузки и фибровых деформаций с интервалом 3 с.

Предполагается, что поперечные сечения полосы при изгибе остаются плоскими, т.е. суммарная деформация по толщине поперечного сечения полосы изменяется линейно. Выражение для изгибающего момента имеет вид

$$M = \frac{h^2 b}{(\varepsilon_p + \varepsilon_c)^2} \int_{-\varepsilon_c}^{\varepsilon_p} \sigma(\varepsilon)\, \varepsilon\, d\varepsilon, \qquad (1)$$

где h – толщина; b – ширина; ε_p – деформация растяжения на поверхности полосы; ε_c – абсолютное значение деформации сжатия на поверхности полосы; $\sigma(\varepsilon)$ – напряжение в произвольной точке ее поперечного сечения. Напряжения и деформации в формуле (1) – это компоненты, направленные вдоль полосы. Функция $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ строится на основании экспериментальных кривых «напряжение – деформация», полученных при одноосном растяжении и одноосном сжатии материала в предположении существования «единой кривой» $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i^{ост})$, не зависящей от вида напряженного состояния. Выражения для интенсивности напряжений и интенсивности деформаций имеют вид

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \qquad (2)$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2},$$

где ν – коэффициент Пуассона, причем $\nu_{упр} = \varepsilon_2^{упр}/\varepsilon_1^{упр} = 0{,}3$; $\nu_{ост} = \varepsilon_2^{ост}/\varepsilon_1^{ост} = 0{,}5$.

Таблица 1. Расположение тензорезисторов и экстензометров

Table 1. Locations of strain gauges and extensometers

Тензорезисторы HBM		Экстензометры Epsilon	
фибровая деформация растяжения	фибровая деформация сжатия	фибровая деформация растяжения	фибровая деформация сжатия
1.2 и 1.4	1.1 и 1.3	2.2	2.1

В случае одноосного растяжения и одноосного сжатия

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0;\ \ \sigma_i = \sigma_1;\ \ \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu\varepsilon_1;\ \ \varepsilon_i = \varepsilon_1. \qquad (3)$$

В случае чистого изгиба

$$\sigma_2 = \nu\sigma_1;\ \ \sigma_3 = 0;\ \ \sigma_i = \sqrt{1-\nu+\nu^2}\,\sigma_1;$$
$$\varepsilon_2 = 0;\ \ \varepsilon_3 = -\frac{\nu}{1-\nu}\varepsilon_1;\ \ \varepsilon_i = \frac{\sqrt{1-\nu+\nu^2}}{1-\nu^2}\varepsilon_1, \qquad (4)$$

где $\sigma_1 = \sigma_p$ (или σ_c) – главное напряжение вдоль полосы (растяжение или сжатие); $\varepsilon_1 = \varepsilon_p$ (или ε_c) – деформация растяжения или сжатия вдоль полосы.

Если модуль нормальной упругости E и функция $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i^{ост})$ известны из испытаний на одноосное растяжение и одноосное сжатие, то при известных из эксперимента значениях ε_p и ε_c на поверхностях полосы изгибающий момент определяется по формуле (1).

Далее будет рассмотрена обратная задача. По экспериментальным данным (изгибающий момент и деформации растяжения и сжатия на поверхности), полученным при испытании на чистый изгиб полосы, определим диаграммы «напряжение – деформация» в условиях одноосного растяжения и одноосного сжатия.

Как показано в [1], соотношение (1) приводится к виду

$$bh^2\frac{\sigma_p\sigma_c}{\sigma_p+\sigma_c} = 2M + \varepsilon\frac{dM}{d\varepsilon}, \qquad (5)$$

где $\varepsilon = (\varepsilon_p + \varepsilon_c)/2$; σ_p – напряжение растяжения на поверхности полосы; σ_c – абсолютное значение напряжения сжатия на поверхности полосы.

Напряжения растяжения и сжатия на поверхности полосы записываются в виде

$$\sigma_p = \frac{1+k}{kbh^2}\left(2M + \varepsilon\frac{dM}{d\varepsilon}\right);\ \ \sigma_c = \frac{1+k}{bh^2}\left(2M + \varepsilon\frac{dM}{d\varepsilon}\right), \qquad (6)$$

где $k = \sigma_c/\sigma_p = d\varepsilon_p/d\varepsilon_c$ определяется из эксперимента.

В результате эксперимента были получены фибровые деформации растяжения и сжатия на поверхности пластины как функции приложенного момента M. Значение параметра k составило 1,01; величины $dM/d\varepsilon$ определялись численно на основании полученных экспериментальных данных. В соответствии с формулами (6) определяются значения напряжений на обеих поверхностях пластины. Полученные в результате обработки экспериментальных данных диаграммы «интенсивность напряжений – интенсивность деформаций» на растянутой и сжатой поверхностях пластины (при сжатии интенсивности приведены со знаком «минус») представлены на рис. 3 (см. вклейку). Для сравнения приведены диаграммы «напряжение – деформация», построенные ранее для условий одноосного растяжения и одноосного сжатия. Из рисунка следует, что диаграммы «напряжение – деформация», полученные при чистом изгибе в упруго-пластической области, хорошо соответствуют данным испытаний на одноосное растяжение и одноосное сжатие и достоверно свидетельствуют об упруго-пластических свойствах материала.

Исследование ползучести полосы в условиях чистого изгиба

Pure-bending creep study

Ползучесть полосы в условиях чистого изгиба исследовалась в [5] без учета различия свойств титанового сплава при растяжении и сжатии. В данной работе проведено расчетно-экспериментальное исследование ползучести полосы с учетом различия свойств материала при растяжении и сжатии. Предполагается, что по аналогии с теорией пластичности имеет место гипотеза «единой кривой», т.е. кривые ползучести, представляющие собой зависимости интенсивности деформаций ползучести от времени, не зависят от вида напряженного состояния.

Для построения расчетных кривых ползучести использовался метод, представленный в [4]. Необходимые параметры материала A_1, A_2, A_3 определялись при испытаниях на одноосное растяжение и одноосное сжатие в режиме управления по деформации с постоянной скоростью суммарной деформации $\dot{\varepsilon}^{сум}$. Испытания проводились при скоростях $3{,}33\cdot10^{-8}$; $3{,}33\cdot10^{-7}$; $3{,}33\cdot10^{-6}$; $3{,}33\cdot10^{-5}$ и $3{,}33\cdot10^{-4}$ 1/с (рис. 4, см. вклейку).

В процессе испытаний регистрировались значения: времени t_k (с), суммарной деформации $\varepsilon_k^{сум}$ и нагрузки P_k (Н).

Зависимость между напряжением $\sigma(t)$ (МПа), остаточной деформацией $\varepsilon^{ост}(t)$ и скоростью остаточной деформации $\dot{\varepsilon}^{ост}(t)$ (1/с) записывается в виде

$$\sigma(t) = A_1 \ln\varepsilon^{ост}(t) + A_2 + A_3 \ln\dot{\varepsilon}^{ост}(t), \qquad (7)$$

где $\varepsilon^{ост}(t) = \varepsilon^{сум}(t) - \frac{\sigma(t)}{E}$; E – модуль нормальной упругости, параметры A_1, A_2, A_3 – характеристики исследуемого материала, МПа [4].

В условиях ползучести $\sigma(t) = \sigma_{полз} = \text{const}$. Из (7) получаем уравнение

$$\sigma_{полз} = A_1 \ln \varepsilon^{ост}(t) + A_2 + A_3 \ln \dot{\varepsilon}^{ост}(t), \quad (8)$$

которое решается в замкнутом виде

$$\varepsilon^{ост}(t) = \left[t \exp\left(\frac{\sigma_{полз} - \gamma}{A_3} \right) \right]^m ;$$
$$\sigma_{полз} = \gamma + (A_1 + A_3) \ln \varepsilon^{ост}(t) - A_3 \ln t = \text{const}, \quad (9)$$

где $\gamma = A_2 + A_3 \ln m$; $m = \dfrac{A_3}{A_1 + A_3}$.

Зная значения параметров A_1, A_2, A_3, можно для любого значения напряжения построить по формулам (9) кривые ползучести «$\varepsilon^{ост} - t$» или кривые ползучести «$\varepsilon^{сум} - t$».

В табл. 2 приведены значения параметров A_1, A_2, A_3 и m, полученные в ходе обработки экспериментальных диаграмм в диапазоне $1 \cdot 10^{-4} \le \varepsilon_k^{ост} \le 1 \cdot 10^{-2}$ при испытаниях на одноосное растяжение и одноосное сжатие, соответственно.

Расчет выполнялся для чистого изгиба полосы шириной $b = 40$ мм и толщиной $h = 10$ мм. Полоса была нагружена до достижения моментом M значения 552,5 кН·мм, при котором на основании статической диаграммы «напряжение – деформация» напряжение на поверхности образца составляло $0{,}95\sigma_{0,2}$; затем нагрузка сохранялась постоянной. Расчет был произведен для моментов времени t, равных 1, 10, 50 и 100 часов. Процедура расчета состоит в следующем.

1. Задаются значения остаточных деформаций на поверхностях пластины в диапазоне $1 \cdot 10^{-4} \le \varepsilon^{ост} \le 1 \cdot 10^{-2}$ с интервалом $1 \cdot 10^{-4}$.
2. Для каждого заданного момента времени по формуле (9) с использованием параметров A_1, A_2, A_3, приведенных в табл. 2, определяются напряжение $\sigma_{полз}$, соответствующая упругая деформация $\varepsilon^{упр} = \sigma_{полз}/E$ и суммарная деформация $\varepsilon^{сум} = \varepsilon^{упр} + \varepsilon^{ост}$. Используя линейность распределения суммарной деформации по толщине пластины, определяют распределение суммарной деформации и соответствующего напряжения по толщине пластины.
3. Полученные распределения по толщине пластины напряжений и суммарных деформаций подставляются в формулу (1), и определяются значения постоянного момента M, соответствующие заданным значениям $\varepsilon^{ост}$ на поверхностях пластины. Искомое значение $\varepsilon^{ост}$ соответствует заданному значению постоянного момента M.

На рис. 5 (см. вклейку) приведено распределение деформаций (*а*) и напряжений (*б*) по толщине образца в заданные моменты времени (через 1, 10, 50 и 100 ч).

Как показывает расчет, в процессе ползучести происходит перераспределение напряжений по сечению полосы, напряжение у поверхности полосы снижается, и имеет место замедление процесса ползучести.

Следует отметить, что полученное решение является в какой-то степени приближенным, поскольку в расчетах использована формула (9), справедливая для описания ползучести при постоянном напряжении. В действительности напряжение в любом волокне балки изменяется с течением времени. Получаемая погрешность может быть оценена на основе следующего из (7) решения о деформациях при переменных напряжениях $\sigma(t)$:

$$\varepsilon^{ост}(t) = \left[\int_0^t \left(\exp \frac{\sigma(\xi) - \gamma}{A_3} \right) d\xi \right]^m .$$

Подстановка в (1) найденной зависимости напряжения и деформации от времени позволяет оценить погрешность решения.

Экспериментальное исследование ползучести полосы проводилось с использованием изложенной

Таблица 2. Параметры A_1, A_2, A_3 и m в исходном состоянии материала

Table 2. Parameters A_1, A_2, A_3 and m in the initial state of material

Одноосное растяжение				Одноосное сжатие			
A_1	A_2	A_3	m	A_1	A_2	A_3	m
МПа				МПа			
9,173	848,3	11,497	0,556	35,438	1062,3	11,535	0,246

выше методики измерений при приложении постоянного момента M. Длительность испытаний составила 70 часов. В процессе испытаний регистрировались во времени фибровые деформации ε_p и ε_c на растянутой и сжатой поверхностях полосы.

Зависимости, представленные на рис. 6 (см. вклейку), показывают хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

Влияние на ползучесть предварительного деформирования противоположного знака

Effect of opposite-sign pre-strain on creep

В работе исследовано влияние предварительного изгиба противоположенного знака полосы, изготовленной из титанового сплава, на ее ползучесть – «эффект Баушингера при ползучести». Для построения расчетных кривых ползучести были экспериментально определены значения параметров A_1, A_2, A_3 для материала, получившего остаточную деформацию растяжения $5\cdot10^{-3}$ (при последующем расчете использовались одни и те же параметры A_1, A_2, A_3 для растянутой и сжатой сторон полосы). Предварительный наклеп одноосным растяжением на 5-кратных цилиндрических образцах проводился с постоянной скоростью продольной деформации $\dot{\varepsilon} = 3{,}33\cdot10^{-4}$ 1/с до достижения значения остаточной деформации $5\cdot10^{-3}$. Затем эти образцы подвергались одноосному сжатию в режиме управления по деформации с постоянной скоростью суммарной деформации $\dot{\varepsilon}^{\text{сум}}$ при скоростях $3{,}33\cdot10^{-7}$; $3{,}33\cdot10^{-6}$; $3{,}33\cdot10^{-5}$ и $3{,}33\cdot10^{-4}$ 1/с. На рис. 7 (см. вклейку) приведены зависимости «напряжение σ – суммарная деформация $\varepsilon^{\text{сум}}$» (*а*) и «напряжение σ – остаточная деформация $\varepsilon^{\text{ост}}$» (*б*), полученные при одноосном сжатии в исходном состоянии и после предварительного растяжения до значения остаточной деформации $5\cdot10^{-3}$. Диаграммы, полученные после деформирования противоположенного знака, существенно отличаются от диаграмм исходного материала и характеризуются, в частности, отсутствием линейного участка.

В табл. 3 приведены значения параметров A_1, A_2, A_3 и m, полученные при обработке экспериментальных диаграмм в диапазоне $1\cdot10^{-4} \le \varepsilon_k^{\text{ост}} \le 1\cdot10^{-2}$, которые существенно отличаются от соответствующих параметров материала в исходном состоянии.

При построении кривых ползучести и распределения напряжений и деформаций по толщине полосы использована процедура, описанная в пункте 3.

Таблица 3. Параметры A_1, A_2, A_3 и m при сжатии после предварительного растяжения до остаточной деформации $5\cdot10^{-3}$

Table 3. Параметры A_1, A_2, A_3 and m under compression after pre-tension up to the residual strain of $5\cdot10^{-3}$

A_1	A_2	A_3	m
МПа			
155,7	1641	11,5	0,0688

В ходе экспериментального исследования полоса нагружалась изгибающим моментом до достижения на поверхностях пластины остаточной деформации $\pm3{,}5\cdot10^{-3}$, затем пластина переворачивалась так, что растянутая и сжатая стороны оказывались, соответственно, в условиях сжатия и растяжения, и производилось нагружение, совпадающее с описанным на стр. 25. Далее выполнялся расчет, аналогичный приведенному на стр. 25, но с использованием параметров A_1, A_2, A_3, представленных в табл. 3 (эти значения были приняты также для растяжения после предварительного сжатия).

На рис. 8 (см. вклейку) показаны расчетные и экспериментальные кривые ползучести после деформирования противоположенного знака (*а*), свидетельствующие об их хорошем соответствии, и приведено сравнение кривых ползучести, полученных в исходном состоянии и после деформирования противоположенного знака (*б*). Как и при упруго-пластическом деформировании, в условиях ползучести деформирование противоположенного знака приводит к разупрочнению материала. Отсутствие на диаграмме «напряжение – деформация» линейного участка вызывает существенное возрастание начальной деформации. Результаты получены для конкретной величины предварительного наклепа $\pm3{,}5\cdot10^{-3}$; для оценки влияния величины предварительного пластического деформирования на ползучесть титанового сплава требуются дальнейшие экспериментальные исследования.

Заключение

Conclusion

Полученные результаты дают возможность утверждать, что развитый математический аппарат и методология испытаний материалов обеспечивают

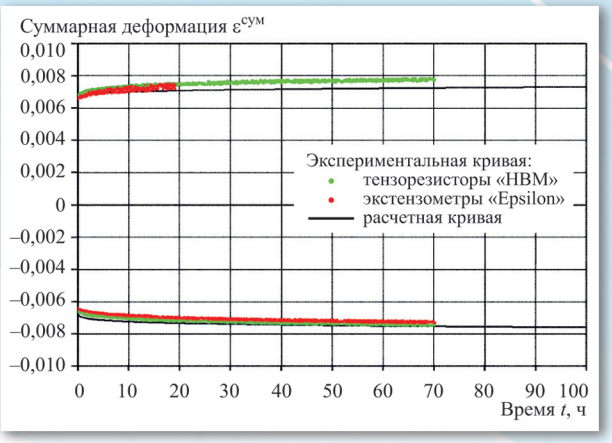


Рис. 6. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых ползучести на растянутой и сжатой поверхностях полосы

Fig. 6. Creep curves for tension and compression surfaces of the strap: calculation vs experiment

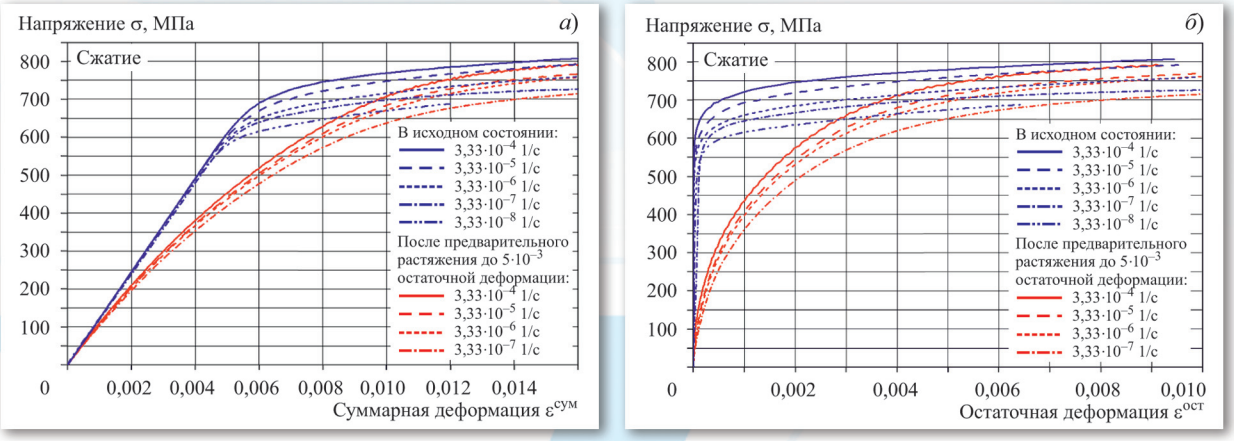


Рис. 7. Зависимости «напряжение – деформация» при одноосном сжатии в исходном состоянии и после предварительной деформации растяжением $5\cdot10^{-3}$ при постоянных скоростях суммарной деформации:
а) «напряжение σ – суммарная деформация $\varepsilon^{сум}$»; *б*) «напряжение σ – остаточная деформация $\varepsilon^{ост}$»

Fig. 7. Stress-strain diagrams for uniaxial compression in the initial state and after pretension ($5\cdot10^{-3}$) at constant total strain rates: *a*) stress σ versus total strain ε^{total}; *b*) stress σ versus residual strain $\varepsilon^{residual}$

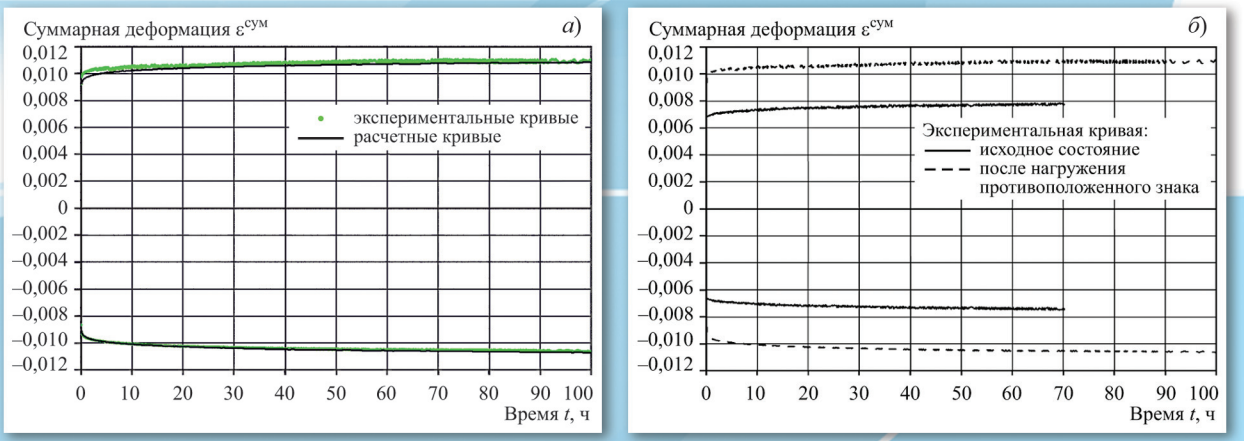
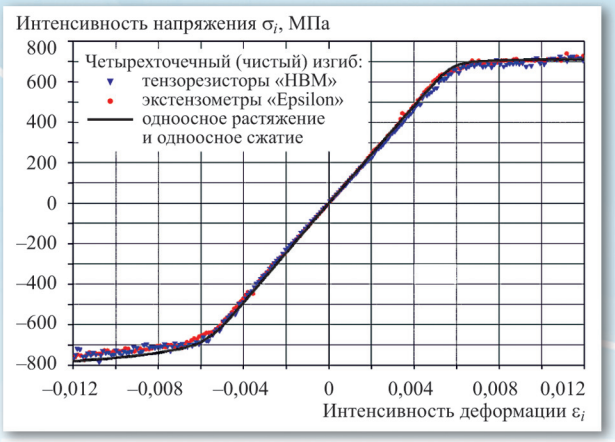


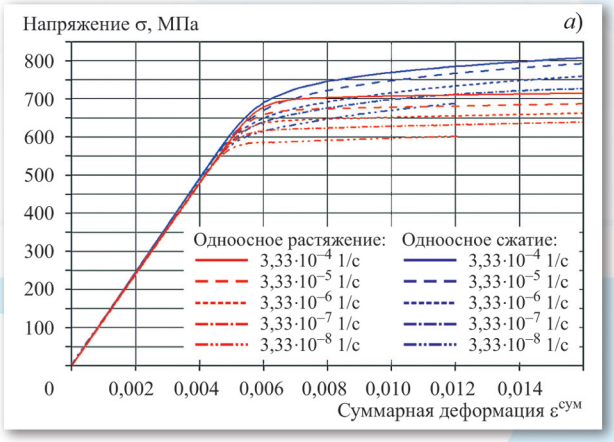
Рис. 8. Влияние предварительного пластического деформирования $\pm3{,}5\cdot10^{-3}$ противоположенного знака в условиях чистого изгиба на кривые ползучести на поверхностях полосы: *а*) расчетные и экспериментальные кривые ползучести на поверхностях полосы после предварительного пластического деформирования противоположенного знака; *б*) кривые ползучести в исходном состоянии и после предварительного пластического деформирования противоположенного знака

Fig. 8. Effect of pure-bending opposite-sign pre-strain ($\pm3.5\cdot10^{-3}$) upon creep curves on the strap surfaces:
a) calculated and experimental curves after opposite-sign pre-bending;
b) creeping curves in the initial state and after opposite-sign plastic pre-strain

Рис. 3. Сопоставление диаграмм «интенсивность напряжений – интенсивность деформаций», полученных в результате расчета на основании экспериментальных данных в условиях чистого изгиба, одноосного растяжения и одноосного сжатия

Fig. 3. Comparison of diagrams "stress intensity – strain intensity" from the test data for pure bend-ing, uniaxial tension and uniaxial compression





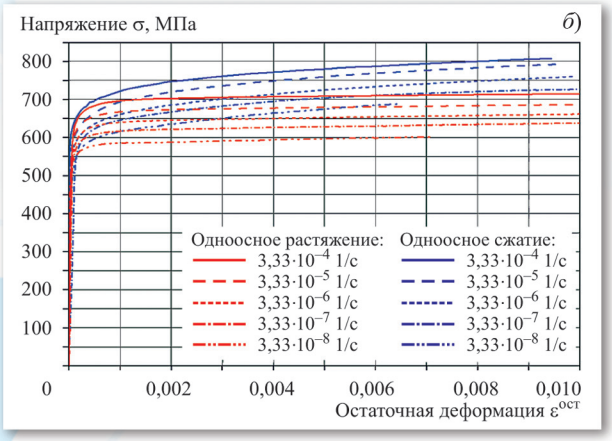
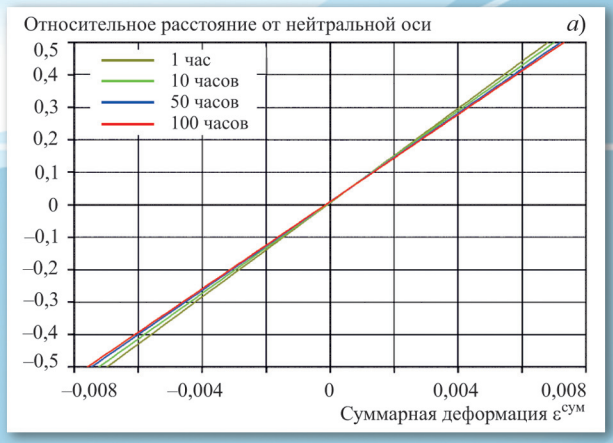


Рис. 4. Зависимости «напряжение – деформация» при одноосном растяжении и одноосном сжатии с постоянными скоростями суммарной деформации:
а) «напряжение σ – суммарная деформация $\varepsilon^{сум}$»; *б*) «напряжение σ – остаточная деформация $\varepsilon^{ост}$»

Fig. 4. Stress-strain diagrams for uniaxial tension and uniaxial compression with constant total strain rates:
a) stress σ versus total strain ε^{total}; *b*) stress σ versus residual strain $\varepsilon^{residual}$



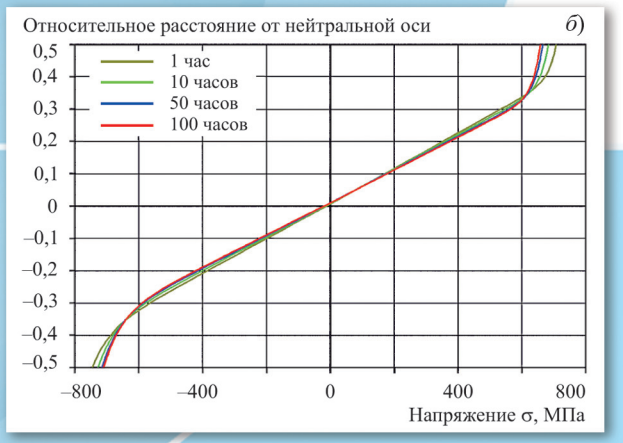


Рис. 5. Расчетное распределение суммарных деформаций и напряжений по толщине полосы в условиях ползучести при чистом изгибе: *а*) распределение суммарных деформаций по толщине полосы; *б*) распределение напряжений по толщине полосы

Fig. 5. Calculated distribution of total strains: *a*) and stresses *b*) in the strap thickness under cold creep conditions in the pure bending

достаточную точность прогнозов процесса ползучести и при неоднородном напряженном состоянии конструктивного элемента (на примере чистого изгиба), а также позволяют учесть предварительное пластическое деформирование.

Библиографический список

1. *Надаи А.* Пластичность и разрушение твердых тел. М.: ИЛ, 1954.
2. *Хилл Р.* Математическая теория пластичности. М.: ТТЛ, 1956.
3. *Качанов Л.М.* Теория ползучести. М.: Физматлит, 1960.
4. *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. Вып. 3(385). 2018. С. 61–76.
5. *Михайлов Э.Ю.*, *Нигматуллин В.И.*, *Палий О.М.*, *Рыбакина О.Г.* Ускоренные расчетно-экспериментальные методы оценки холодной ползучести титановых сплавов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 93(377). С. 7–16.

References

1. *A. Nadai*. Theory of flow and fracture of solids. Moscow: Inostrannaya Literatura, 1954 (*Russian translation*).
2. *R. Hill*. The Mathematical Theory of Plasticity. Moscow: TTL Publishing House, 1956 (*Russian translation*).
3. *L. Kachanov*. Creep theory. Moscow: Fizmatlit, 1960 (*in Russian*).
4. *E. Mikhailov*, *V.I. Nigmatullin*, *O.G. Rybakina.* Effect of stressed state type and loading history on titanium alloy creep // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Issue 3(385). P. 61–76 (*in Russian*).
5. *E. Mikhailov*, *V. Nigmatullin*, *O. Palii*, *O. Rybakina*. Fast computational & experimental methods for creep estimation of titanium alloys // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2016. Issue 93(377). P. 7–16 (*in Russian*).

Сведения об авторах

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

Строгонова Ольга Александровна, к.т.н., научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (921) 306-34-25. E-mail: o.a.strogonova@gmail.com.

About the authors

Vladimir I. Nigmatullin, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (904) 607-66-57. E-mail: vertigobos@yandex.ru.

Oksana G. Rybakina, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (950) 037-18-08. E-mail: rybakina37@mail.ru.

Olga A. Strogonova, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (921) 306-34-25. E-mail: o.a.strogonova@gmail.com.

Поступила / Received: 31.05.19
Принята в печать / Accepted: 18.07.19
© Коллектив авторов, 2019