



УДК 539.376
EDN: **NCUTFK**

Ползучесть и длительная прочность водородсодержащего титанового сплава ВТ6 при кусочно-постоянной зависимости растягивающего напряжения от времени

А. М. Локощенко¹, Л. В. Фомин¹,
П. М. Третьяков^{1,2}, Д. Д. Махов^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики, Россия, 119192, Москва, Мичуринский проспект, 1.

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Механико-математический факультет, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Аннотация

Рассматривается ползучесть наводороженного стержня из титанового сплава ВТ6 при кусочно-постоянной зависимости напряжения от времени вплоть до разрушения. Обсуждаются результаты экспериментально-теоретического исследования влияния концентрации предварительно внедренного водорода на ползучесть и длительную прочность растягиваемых стержней из титанового сплава ВТ6 при температуре 600 °С и постоянных номинальных растягивающих напряжениях в диапазоне от 47 до 217 МПа.

Ключевые слова: ползучесть, длительная прочность, наводороживание, ступенчатое нагружение.

Получение: 25 декабря 2022 г. / Исправление: 12 февраля 2023 г. /
Принятие: 27 февраля 2023 г. / Публикация онлайн: 24 марта 2023 г.

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ Научная статья

© Коллектив авторов, 2023

© СамГТУ, 2023 (составление, дизайн, макет)

Контент публикуется на условиях лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

Образец для цитирования

Локощенко А. М., Фомин Л. В., Третьяков П. М., Махов Д. Д. Ползучесть и длительная прочность водородсодержащего титанового сплава ВТ6 при кусочно-постоянной зависимости растягивающего напряжения от времени // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2023. Т. 27, № 1. С. 179–188. EDN: **WXLOUH**. DOI: [10.14498/vsgtu1971](https://doi.org/10.14498/vsgtu1971).

Сведения об авторах

Александр Михайлович Локощенко <https://orcid.org/0000-0002-5462-6055>
доктор физико-математических наук, профессор

Леонид Викторович Фомин <https://orcid.org/0000-0002-9075-5049>
кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник; лаб. ползучести и длительной прочности; e-mail: fleonid1975@mail.ru

Влияние водорода на сопротивление пластической деформации титановых сплавов с позиции металловедения изучено достаточно подробно [1, 2]. Однако явлению ползучести при температурах, превышающих температуры традиционного применения титановых сплавов, в том числе жаропрочных (выше 500 °С), уделено недостаточное внимание. Кроме того, информация о закономерностях деформационного поведения водородсодержащих титановых сплавов, особенно гетерофазных, весьма противоречива. Это обусловлено интенсивным влиянием водорода не только на процессы необратимой деформации α - и β -фаз, но и на изменение объемного соотношения фаз в сплавах, размеры и морфологию фаз, концентрацию в них легирующих элементов (Al, V и др.), прочность фаз и др. Все эти факторы, которые в совокупности можно назвать структурными, сами по себе оказывают существенное влияние на процессы необратимой деформации [1, 2]. Поэтому для изучения влияния растворенного водорода на ползучесть водородсодержащих гетерофазных титановых сплавов, получения достаточно достоверных результатов и их корректного анализа необходимы методические подходы, позволяющие максимально снизить влияние ряда перечисленных структурных факторов на механизм и параметры ползучести.

Настоящая работа базируется на использовании введенного Л. М. Качановым [3] и Ю. Н. Работновым [4] параметра поврежденности и разработанной впоследствии Ю. Н. Работновым [5] кинетической теории ползучести и длительной прочности. Основой этого подхода при одноосном растяжении является введение скалярного параметра поврежденности $\omega(t)$, характеризующего структурное состояние материала при произвольном значении времени t . Исходному состоянию материала (при $t = 0$) соответствует значение $\omega = 0$, при разрушении в момент времени t^* поврежденность $\omega(t^*) = 1$. При рассмотрении длительной прочности в случае одноосного растяжения Л. М. Качанов [3] дополнил уравнение ползучести дифференциальным кинетическим уравнением, характеризующим изменение параметра $\psi = 1 - \omega$ во времени, а Ю. Н. Работнов [6] дополнительно ввел параметр ω в уравнение ползучести (для учета влияния процесса накопления поврежденности на процесс ползучести).

Рассмотрим результаты экспериментально-теоретического исследования влияния водорода на ползучесть и длительную прочность сплава ВТ6 при одноосном растяжении [7, 8]. В [7, 8] образцы двухфазного ($\alpha + \beta$)-титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) насыщались водородом термодиффузионным способом в аппаратуре Сивертса. Аппаратура позволяет получать высокочистый газообразный водород и проводить гидрирование в высоком вакууме при температурах 600–900 °С, что исключает окисление поверхности образцов. Введение в сплав водорода, являющегося эффективным стабилизатором высокотемпературной β -фазы, приводит к увеличению ее объемной доли и, соответственно, к снижению доли α -фазы.

Петр Максимович Третьяков  <https://orcid.org/0000-0002-8221-3127>

ведущий инженер; лаб. ползучести и длительной прочности¹; студент; механико-математический факультет²; e-mail: pet3tyak@gmail.com

Денис Дмитриевич Махов  <https://orcid.org/0000-0001-7748-3934>

ведущий инженер; лаб. ползучести и длительной прочности¹; студент; механико-математический факультет²; e-mail: monyamail@yahoo.com

В исходном состоянии (концентрация водорода c не более 0.008 мас. %) ¹ образцы горячекатаного прутка сплава ВТ6 имели структуру с глобулярной или близкой к глобулярной α -фазой в виде частиц размером 2–5 мкм и β -фазой в промежутках между частицами α -фазы.

В образцы вводился водород до концентраций $c = \{0.1, 0.2, 0.3\}\%$ с точностью $\pm 0.02\%$. Результаты испытаний на ползучесть и длительную прочность сплава приведены в числителях столбцов табл. 1. В таблице приняты следующие обозначения: σ_0 — номинальное напряжение, равное отношению величины постоянной растягивающей силы P к площади недеформированного поперечного сечения F_0 ; $\dot{p}_0 = f(\sigma_0)$ — скорость установившейся ползучести; p^* — предельное значение логарифмической деформации растяжения; числители t^* — экспериментальное время до разрушения. Испытания проводились в широком диапазоне номинальных напряжений σ_0 (от 47 до 217 МПа).

Из условия несжимаемости необратимой деформации следует зависимость текущего напряжения σ от времени t при $\sigma_0 = \text{const}$:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp[p(t)]. \quad (1)$$

Из данных табл. 1 следует, что увеличение доли предварительно внедренного водорода приводит к систематическому уменьшению скорости установившейся ползучести \dot{p}_0 , увеличению времени до разрушения t^* и, как правило, уменьшению предельной деформации p^* в несколько раз. Для теоретического описания реологического процесса деформации титанового сплава с предварительно внедренным водородом в [7, 8] был использован вариант кинетической теории Ю. Н. Работнова [5]. С этой целью был введен зависящий от времени параметр поврежденности $\omega(t)$. При этом зависимости скорости деформации ползучести \dot{p} и скорости накопления поврежденности $\dot{\omega}$ являются функциями не только $\sigma(t)$ и $\omega(t)$, но и средней концентрации $c(t)$ водорода в металле.

Для зависимостей скоростей \dot{p} и $\dot{\omega}$ от поврежденности ω вместо общепринятой степенной функции $(1 - \omega(t))^{-1}$ в [7, 8] была рассмотрена экспоненциальная функция $e^{\omega(t)}$.

Для теоретического описания ползучести наводороженного сплава ВТ6 предлагается система уравнений:

$$\frac{dp}{dt} = A(\sigma(t)e^{\omega(t)})^n f_1(c), \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = B(\sigma(t)e^{\omega(t)})^k f_2(c). \quad (3)$$

Определяемые с помощью уравнений (2) и (3) функции $p(t)$ и $\omega(t)$ удовлетворяют начальным $p(0) = 0$, $\omega(0) = 0$ и конечному $\omega^* = \omega(t^*) = 1$ значениям.

Функция $f_1(c)$ характеризует уменьшение скорости \dot{p} деформации ползучести при увеличении концентрации c . По аналогии с $f_1(c)$ функция $f_2(c)$ определяет скорость $\dot{\omega}(t)$ накопления поврежденности в зависимости от величины c . Значения $f_1(c)$ определяются как отношения скоростей деформации ползучести сплава с водородом и без него (исходный сплав). Значения $f_2(c)$

¹Здесь и далее концентрация водорода указана в масс. %.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов титанового сплава ВТ6 с разной концентрацией c водорода
 [Test results for samples of titanium alloy VT6 (Ti-6Al-4V) with different hydrogen concentrations c]

σ_0 , МПа	$c = 0$			$c = 0.1\%$			$c = 0.2\%$			$c = 0.3\%$		
	\dot{p}_0 , h^{-1}	p^*	t^* , h	\dot{p}_0 , h^{-1}	p^*	t^* , h	\dot{p}_0 , h^{-1}	p^*	t^* , h	\dot{p}_0 , h^{-1}	p^*	t^* , h
47	$\frac{0.0036}{0.0024}$	$\frac{0.565}{0.579}$	$\frac{83.10}{57.97}$	$\frac{0.0038}{0.0017}$	$\frac{0.82}{0.57}$	$\frac{100.36}{80.27}$	—	—	—	—	—	—
	$\frac{0.0162}{0.0066}$	$\frac{0.655}{0.525}$	$\frac{24.76}{19.40}$	$\frac{0.0075}{0.0047}$	$\frac{0.59}{0.51}$	$\frac{27.96}{26.84}$	$\frac{0.0028}{0.0015}$	$\frac{0.30}{0.24}$	$\frac{38.00}{45.30}$	—	—	—
117	$\frac{0.0556}{0.0332}$	$\frac{0.613}{0.452}$	$\frac{4.72}{3.45}$	$\frac{0.0470}{0.0230}$	$\frac{0.54}{0.44}$	$\frac{7.02}{4.77}$	$\frac{0.041}{0.008}$	$\frac{0.18}{0.20}$	$\frac{2.12}{7.83}$	$\frac{0.0008}{0.0010}$	$\frac{0.21}{0.13}$	$\frac{73.00}{40.90}$
	$\frac{0.1940}{0.0931}$	$\frac{0.448}{0.409}$	$\frac{1.16}{1.14}$	$\frac{0.0990}{0.0660}$	$\frac{0.31}{0.40}$	$\frac{1.79}{1.58}$	$\frac{0.119}{0.021}$	$\frac{0.30}{0.18}$	$\frac{1.10}{2.55}$	$\frac{0.0030}{0.0030}$	$\frac{0.14}{0.12}$	$\frac{11.00}{13.20}$
217	$\frac{0.4374}{0.1989}$	$\frac{0.374}{0.382}$	$\frac{0.43}{0.51}$	$\frac{0.2840}{0.1410}$	$\frac{0.29}{0.37}$	$\frac{0.55}{0.70}$	$\frac{0.129}{0.046}$	$\frac{0.36}{0.17}$	$\frac{0.99}{1.17}$	$\frac{0.0257}{0.0060}$	$\frac{0.15}{0.11}$	$\frac{2.31}{5.77}$

находятся из сопоставления времен до разрушения t^* при разных значениях концентрации c .

Рассмотрим малые значения времени t , при которых деформация p и поврежденность ω являются малыми величинами, следовательно, можно полагать $\sigma = \sigma_0$. Из уравнения (2) находим скорость установившейся ползучести:

$$\dot{p}_0(c) = A\sigma_0^n f_1(c). \quad (4)$$

Согласно соотношению (4), скорость установившейся деформации $\dot{p}_0(0)$ сплава без водорода при $f_1(0) = 1$ составляет:

$$\dot{p}_0(0) = A\sigma_0^n. \quad (5)$$

Из сопоставления соотношений (4) и (5) находим, что $f_1(c) = \dot{p}_0(c)/\dot{p}_0(0)$.

Постоянные A и n в соотношениях (4) и (5) вычисляются из аппроксимации экспериментальной зависимости скорости установившейся ползучести $\dot{p}_0(0)$ от номинального напряжения σ_0 зависимостью (5), а величина B — из сопоставления теоретических и экспериментальных деформационных кривых при совместном решении (2) и (3):

$$n = 2.9, \quad k = 3.2, \quad A = 3.33 \cdot 10^{-8} (\text{МПа})^{-2.9} \cdot \text{час}^{-1}, \\ B = 1.43 \cdot 10^{-8} (\text{МПа})^{-3.2} \cdot \text{час}^{-1}.$$

Приведем значения функций $f_1(c)$ и $f_2(c)$ при разных концентрациях водорода c :

$c, \%$	0	0.1	0.2	0.3
$f_1(c)$	1.00	0.71	0.23	0.03
$f_2(c)$	1.00	0.73	0.54	0.11

В знаменателях столбцов табл. 1 приведены теоретические значения всех характеристик ползучести и длительной прочности сплава при различных уровнях σ_0 и c .

Рассмотрим ползучесть водородсодержащего стержня при ступенчатом изменении напряжения. На первой стадии ($0 \leq t \leq t_1$) действует растягивающее напряжение σ_{01} . Здесь $t_1 = t_1^*/2$, где t_1^* — осредненное время разрушения при напряжении σ_{01} . Значения t_1^* приведены в табл. 1 в знаменателях величин t^* при различных уровнях концентрации c . На второй стадии ($t_1 \leq t \leq t^*$) растягивающее напряжение ступенчато изменяется с величины σ_{01} на величину σ_{02} и действует вплоть до момента разрушения ($t = t^*$), при этом $\omega(t^*) = 1$.

Рассмотрим первую стадию нагружения. Согласно (1), для растягивающего текущего напряжения на первой стадии имеем

$$\sigma(t) = \sigma_{01} e^{p(t)}. \quad (6)$$

Разделим (2) на (3) с учетом (6):

$$\frac{dp}{d\omega} = C_1 [e^p e^\omega]^{n-k}, \quad C_1 = \frac{A}{B} \sigma_{01}^{n-k} \frac{f_1(c)}{f_2(c)},$$

откуда

$$e^{(k-n)p} dp = \frac{A}{B} [\sigma_{01} e^{\omega}]^{n-k} \frac{f_1(c)}{f_2(c)} d\omega. \quad (7)$$

Проинтегрировав (7) при начальных условиях $p(0) = 0$ и $\omega(0) = 0$, получим

$$e^{kp} = [1 + C_1(1 - e^{(n-k)\omega})]^{k/(k-n)}. \quad (8)$$

Подстановка (8) в (3) позволяет установить дифференциальное уравнение для $\omega = \omega(t)$ на первом этапе:

$$\frac{d\omega}{dt} = C_2 [1 + C_1(1 - e^{(n-k)\omega})]^{k/(k-n)} e^{k\omega}, \quad \omega(0) = 0, \quad (9)$$

где $C_2 = B\sigma_{01}^k f_2(c)$.

Деформация ползучести вычисляется с помощью соотношения (8):

$$p(\omega) = \frac{1}{k-n} \ln[1 + C_1(1 - e^{(n-k)\omega})]. \quad (10)$$

Зависимость деформации ползучести p от времени определяется с помощью совместного решения уравнений (9) и (10).

Окончание первой стадии происходит в момент времени $t_1 = t_1^*/2$, при этом величина t_1^* определяется из условия $\omega(t_1^*) = 1$, накладываемого на решение дифференциального уравнения (9) при постоянном напряжении σ_{01} . Значение времени до разрушения t_1^* при действии постоянных напряжений σ_{01} приведено в знаменателях дробей в табл. 1.

В конце первой стадии поврежденность $\omega_1 = \omega(t_1)$, а деформация ползучести $p_1 = p(t_1)$ принимает значение:

$$p_1 = \frac{1}{(k-n)} \ln[1 + C_1(1 - e^{(n-k)\omega_1})].$$

Рассмотрим вторую стадию нагружения. На второй стадии напряжение (1) имеет вид

$$\sigma(t) = \sigma_{02} e^{p(t)}. \quad (11)$$

Тогда из (2), (3), (11) получаем уравнение

$$e^{(k-n)p} dp = \frac{A}{B} [\sigma_{02} e^{\omega}]^{n-k} \frac{f_1(c)}{f_2(c)}, \quad p(t_1) = p_1, \quad \omega(t_1) = \omega_1,$$

после интегрирования которого находим

$$e^{kp} = \left[e^{(k-n)p_1} + \frac{A}{B} \sigma_{02}^{n-k} \frac{f_1(c)}{f_2(c)} (e^{(n-k)\omega_1} - e^{(n-k)\omega}) \right]^{k/(k-n)}. \quad (12)$$

Используя (1), (3), (12), получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{d\omega}{dt} = B\sigma_{02}^k f_2(c) \left[e^{(k-n)p_1} + \frac{A}{B} \sigma_{02}^{n-k} \frac{f_1(c)}{f_2(c)} (e^{(n-k)\omega_1} - e^{(n-k)\omega}) \right]^{k/(k-n)} e^{k\omega}, \quad (13)$$

из которого определяем время t^* на основании условия $\omega(t^*) = 1$.

Деформация ползучести $p(t)$ на второй стадии рассчитывается с помощью совместного использования уравнений (12) и (13), при этом значение $p^* = p(t^*) = p(\omega)$ при $\omega = 1$.

В табл. 2 приведены основные расчетные данные для водородсодержащих стержней из титанового сплава ВТ6 в условиях ползучести при температуре 600 °С, полученные для четырех программ нагружения:

- программа 1: $\sigma_{01} = 167$ МПа при $t \in [0, t_1]$, $\sigma_{02} = 217$ МПа при $t \in [t_1, t_1^*]$;
- программа 2: $\sigma_{01} = 217$ МПа при $t \in [0, t_1]$, $\sigma_{02} = 167$ МПа при $t \in [t_1, t_1^*]$;
- программа 3: $\sigma_{01} = 67$ МПа при $t \in [0, t_1]$, $\sigma_{02} = 117$ МПа при $t \in [t_1, t_1^*]$;
- программа 4: $\sigma_{01} = 117$ МПа при $t \in [0, t_1]$, $\sigma_{02} = 67$ МПа при $t \in [t_1, t_1^*]$.

Таблица 2

Результаты вычислений [Calculation results]

	$c = 0\%$	$c = 0.1\%$	$c = 0.2\%$	$c = 0.3\%$
Программа 1 [Loading program no.1]				
$t_1, \text{ h}$	0.570	0.790	1.275	6.600
p_1	0.071	0.070	0.036	0.024
ω_1	0.147	0.149	0.176	0.202
p^*	0.383	0.373	0.169	0.011
$t^*, \text{ h}$	0.823	1.138	1.832	9.486
Программа 2 [Loading program no.2]				
$t_1, \text{ h}$	0.255	0.350	0.585	2.885
p_1	0.068	0.067	0.036	0.023
ω_1	0.153	0.152	0.191	0.186
p^*	0.402	0.392	0.177	0.114
$t^*, \text{ h}$	0.822	1.138	1.799	9.500
Программа 3 [Loading program no.3]				
$t_1, \text{ h}$	9.699	13.419	22.619	—
p_1	0.086	0.0847	0.046	—
ω_1	0.135	0.137	0.1684	—
p^*	0.462	0.450	0.205	—
$t^*, \text{ h}$	11.417	15.795	26.521	—
Программа 4 [Loading program no.4]				
$t_1, \text{ h}$	1.725	2.385	3.914	20.42
p_1	0.077	0.075	0.173	0.027
ω_1	0.142	0.144	0.039	0.183
p^*	0.513	0.5007	0.227	0.147
$t^*, \text{ h}$	11.464	15.859	26.601	139.839

Приведенные в табл. 2 данные, а также результаты численного анализа деформационных кривых по разработанной модели ползучести и длительной прочности показывают, что независимо от уровня концентрации водорода с деформация ползучести при ступенчатом уменьшении σ_0 превышает деформацию ползучести при ступенчатом увеличении соответствующих напряжений. При этом увеличение уровня предварительно внедренного водорода с приводит к увеличению значения времени до разрушения t_1^* и к уменьшению значения предельной деформации $p^* = p(t_1^*)$.

Конкурирующие интересы. Заявляем, что в отношении авторства и публикации этой статьи конфликта интересов не имеем.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи; все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной рукописи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Финансирование. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 20–80–00387_а).

Библиографический список

1. Носов В. К., Колачев Б. А. *Водородное пластифицирование при горячей деформации титановых сплавов*. М.: Металлургия, 1986. 118 с.
2. Ильин А. А., Колачев Б. А., Носов В. К., Мамонов А. М. *Водородная технология титановых сплавов*. М.: МИСИС, 2002. 392 с.
3. Качанов Л. М. О времени разрушения в условиях ползучести // *Изв. АН СССР. Отд. техн. наук*, 1958. № 8. С. 26–36.
4. Работнов Ю. Н. О механизме длительного разрушения / *Вопросы прочности материалов и конструкций*. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 5–7.
5. Работнов Ю. Н. *Ползучесть элементов конструкций*. М.: Наука, 1966. 752 с.
6. Работнов Ю. Н. О разрушении вследствие ползучести // *ПМТФ*, 1963. № 2. С. 113–123.
7. Локощенко А. М., Ильин А. А., Мамонов А. М., Назаров В. В. Экспериментально-теоретическое исследование влияния водорода на ползучесть и длительную прочность титанового сплава ВТ6 // *Металлы*, 2008. № 2. С. 60–66. EBN: [IJPPCZ](#).
8. Локощенко А. М., Ильин А. А., Мамонов А. М., Назаров В. В. Анализ ползучести и длительной прочности титанового сплава ВТ6 с предварительно внедренным водородом // *Физ.-хим. мех. матер.*, 2008. № 5. С. 98–104.

MSC: 74R20

Creep and long-term strength of hydrogen-containing VT6 titanium alloy with a piecewise constant dependence of tensile stress on time

A. M. Lokoshchenko¹, **L. V. Fomin**¹,
P. M. Tretyakov^{1,2}, **D. D. Makhov**^{1,2}

¹ Lomonosov Moscow State University, Institute of Mechanics,
1, Michurinsky prospekt, Moscow, 119192, Russian Federation.

² Lomonosov Moscow State University,
Department of Mechanics and Mathematics,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation.

Abstract

We consider the creep of a hydrogenated rod made of VT6 (Ti-6Al-4V) titanium alloy with a piecewise constant dependence of the stress on time up to failure. The results of an experimental and theoretical study on the effect of the concentration of previously introduced hydrogen on the creep and long-term strength of tensile rods made of VT6 titanium alloy at a temperature of 600°C and constant nominal tensile stresses in the range from 47 to 217 MPa.

Keywords: creep, long-term strength, hydrogen saturation, step loading.

Received: 25th December, 2022 / Revised: 12th February, 2023 /

Accepted: 27th February, 2023 / First online: 24th March, 2023

Competing interests. We declare that we have no conflicts of interest in the authorship and publication of this article.

Authors' contributions and responsibilities. Each author has participated in the article concept development; the authors contributed equally to this article. The authors

**Mathematical Modeling, Numerical Methods and Software Complexes
Research Article**

© Authors, 2023

© Samara State Technical University, 2023 (Compilation, Design, and Layout)

 The content is published under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Please cite this article in press as:

Lokoshchenko A. M., Fomin L. V., Tretyakov P. M., Makhov D. D. Creep and long-term strength of hydrogen-containing VT6 titanium alloy with a piecewise constant dependence of tensile stress on time, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2023, vol. 27, no. 1, pp. 179–188. EDN: **WXL0UH**. DOI: [10.14498/vsgtu1971](https://doi.org/10.14498/vsgtu1971) (In Russian).

Authors' Details:

Alexander M. Lokoshchenko  <https://orcid.org/0000-0002-5462-6055>

Dr. Phys. & Math. Sci., Professor

Leonid V. Fomin  <https://orcid.org/0000-0002-9075-5049>

Cand. Phys. & Math. Sci.; Leading Researcher; Lab. of Creep and Long-Term Strength;

e-mail: fleonid1975@mail.ru

are absolutely responsible for submit the final manuscript to print. Each author has approved the final version of manuscript.

Funding. This study was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20–80–00387_a).

References

1. Nosov V. K., Kolachev B. A. *Vodorodnoe plastifitsirovanie pri goriachei deformatsii titanovykh splavov* [Hydrogen Plasticization in Hot Deforming of Titanium Alloys]. Moscow, Metallurgiya, 1986, 118 pp. (In Russian)
2. Il'in A. A., Kolachev B. A., Nosov V. K., Mamonov A. M. *Vodorodnaia tekhnologiya titanovykh splavov* [Hydrogen Technology of Titanium Alloys]. Moscow, MISIS, 2002, 392 pp. (In Russian)
3. Kachanov L. M. Time of the rupture process under creep conditions, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otd. Techn. Nauk*, 1958, no. 8, pp. 26–36 (In Russian).
4. Rabotnov Yu. N. Mechanism of long-term destruction, In: *Strength of Materials and Structures*. Moscow, USSR Academy of Sciences, 1959, pp. 5–7 (In Russian).
5. Rabotnov Yu. N. *Creep problems in structural members*. Amsterdam, London, North-Holland Publ. Co., 1969, xiv+822 pp.
6. Rabotnov Yu. N. On fracture as a consequence of creep, *Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.*, 1963, no. 2, pp. 113–123 (In Russian).
7. Lokoshchenko A. M., Il'in A. A., Mamonov A. M., Nazarov V. V. Experimental and theoretical study of the effect of hydrogen on the creep and long-term strength of VT6 titanium alloy, *Russ. Metall.*, 2008, vol. 2008, no. 2, pp. 142–147. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029508020109>. EDN: LLNZQN.
8. Lokoshchenko A. M., Nazarov V. V., Il'in A. A., Mamonov A. M. Analysis of the creep and long-term strength of VT6 titanium alloy with preliminarily injected hydrogen, *Mater. Sci.*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 700–707. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9128-0>. EDN: KHLBHT.

Petr M. Tretyakov  <https://orcid.org/0000-0002-8221-3127>

Leading Engineer; Lab. of Creep and Long-Term Strength¹; Student; Dept. of Mechanics and Mathematics²; e-mail: pet3tyak@gmail.com

Denis D. Makhov  <https://orcid.org/0000-0001-7748-3934>

Leading Engineer; Lab. of Creep and Long-Term Strength¹; Student; Dept. of Mechanics and Mathematics²; e-mail: monyamail@yahoo.com