

Received: 30.11.2021

Revised: 16.03.2022



Accepted: 15.04.2022

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.2.021-034

REVIEW OF THE AUTHOR'S OWN RESULTS OBTAINED FROM MECHANICAL TESTING OF TITANIUM ALLOYS

V. V. Nazarov

*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University
1 Michurinskiy Ave., Moscow, 119192, Russian Federation*

 <https://orcid.org/0000-0002-9234-3646>  inmec130@mail.ru

Corresponding author. E-mail: inmec130@mail.ru

Address for correspondence: 1 Michurinskiy Ave., Moscow, 119192, Russian Federation

Experimental data obtained at different times by the author for various titanium alloys are collected in one place. The mechanical properties of the VT1-0 alloy at normal temperature, the creep and creep rupture of the VT5 and VT6 alloys at 650 °C, the secondary creep of the VT1-0 alloy under complex stress conditions at 550 °C are considered. The final values of strains observed either at the rupture time or at mechanical test termination are taken as a criterion for combining all these data.

Keywords: titanium alloy, hydrogen, tension, torsion.

Acknowledgment

The work was partially financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 20-08-00387.

References

1. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov* [Metal science and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow, MISIS Publ., 2001, 416 p. ISBN: 5-87623-027-8. (In Russian).
2. Nazarov V.V., Lepeshkin A.R. Features of shaping and fracture of a rectangular plate with a circular hole. *Izvestiya VolgGTU*, 2016, No. 2 (181), pp. 75–78. (In Russian).
3. Nazarov V.V. Short-term creep of titanium alloys VT5 and VT6 at high temperature. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2015, vol. 81, No. 6, pp. 57–60. (In Russian).
4. Norton F.H. *Creep of Steel at High Temperatures*, New York, Mc. Graw-Hill Book Company, 1929, 67 p.
5. Bailey R.W. Creep of steel under simple and compound stresses and the use of high initial temperature in steam power plant, *Trans. World Power Conf. 3*, Tokyo Sectional Meeting, 1929, pp. 1089.
6. Shesterikov S.A., Yumasheva M.A. Specification of equation of state in creep theory. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela*, 1984, No. 1, pp. 86–91. (In Russian).
7. Liying Z., Yongqing Z., Xiaonan M., Quan H., Yunlian Q. Creep features of Ti-600 alloy at the temperature of 650°C. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 941, pp. 995–1003. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.995.
8. Nazarov V.V. Approximation of the creep curve up to the moment of necking. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, iss. 3, pp. 61–66. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.3.061-066. Available at: https://dream-journal.org/issues/2020-3/2020-3_116.html

9. Zamaraev L.M., Smirnov S.V. High-temperature short-term creep of the Grade 2 and Ti–5Al titanium alloys under heating in air and helium. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1915, pp. 040069. DOI: 10.1063/1.5017417.
10. 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. *Materials Science*, 2008, vol. 44, No. 5, pp. 700–707. DOI: 10.1007/s11003-009-9128-0.
11. Lokoshchenko A.M., Nazarov V.V., Il'in A.A., Mamonov A.M. Experimental and theoretical study of the effect of hydrogen on the creep and long-term strength of VT6 titanium alloy. *Russian metal-lurgy (Metally)*, 2008, vol. 2008, No. 2, pp. 142–147. DOI: 10.1134/S0036029508020109.
12. Nazarov V.V. Influence of hydrogen on the creep and rupture of titanium alloys. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2012, vol. 78, No. 12, pp. 59–65. (In Russian).
13. Nazarov V.V. Description of steady creep under tension and torsion of tubular samples. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2015, vol. 81, No. 7, pp. 60–61. (In Russian).
14. Nazarov V.V. Mechanical properties of a VT1-0 titanium alloy creep under tension and torsion of tubular specimens. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2017, vol. 83, No. 2, pp. 66–68. (In Russian).

Подана в журнал: 30.11.2021



УДК 539.376

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.2.021-034

ОБЗОР ПО СОБСТВЕННЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В. В. Назаров

*Научно-исследовательский институт механики
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Мичуринский проспект, 1, Москва, Российская Федерация*

 <https://orcid.org/0000-0002-9234-3646>  inmec130@mail.ru

Ответственный автор. Электронная почта: inmec130@mail.ru
Адрес для переписки: Мичуринский проспект, 1, Москва, 119192, Российская Федерация

Собраны экспериментальные данные, которые получены в разное время автором для различных титановых сплавов. Рассмотрены механические свойства сплава ВТ1–0 при комнатной температуре, ползучесть и длительная прочность сплавов ВТ5 и ВТ6 при 650 °С, установившаяся ползучесть сплава ВТ1–0 в условиях сложного напряженного состояния при 550 °С. Критерием объединения всех этих данных послужили конечные значения деформаций, которые наблюдались либо в момент времени разрушения, либо в момент прекращения проведения механического испытания.

Ключевые слова: титановый сплав, водород, растяжение, кручение.

1. Введение

Титановые сплавы обладают низкой плотностью, высокой удельной прочностью и значительной прочностью при высоких температурах. Применение титановых сплавов в авиационной и ракетной технике наиболее целесообразно в диапазоне температур от 250 до 600 °С, когда легкие алюминиевые сплавы и магниевые сплавы уже не могут работать, а стальные и никелевые сплавы уступают им по удельной прочности.

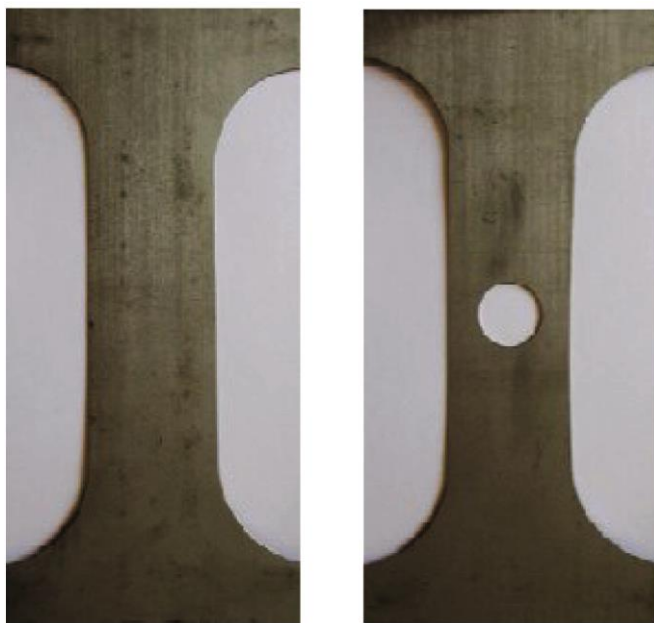
Титан особенно интенсивно взаимодействует с кислородом при температурах выше 700 °С [1]. При нагревании в воздушной среде на поверхности титановых сплавов образуется пленка в виде диоксида титана TiO_2 . Титан адсорбирует большое количество водорода при высоких температурах. Например, титан поглощает 32 000 кубических см на 100 г водорода, а железо и алюминий – лишь 1,31 и 0,026 кубических см при 600 °С и атмосферном давлении. Реакция водорода с титаном химически обратима, при этом водород обратно выводится из титанового сплава при разрушении поверхностной пленки диоксида титана TiO_2 при нагревании титанового сплава в вакууме.

Цель работы – собрать в одном месте экспериментальные данные, которые получены самим автором для различных титановых сплавов. Результаты этих экспериментальных исследований следует рассматривать как отдельные серии, которые не связаны между собой и перечисленные ниже в тексте.

2. Одноосное растяжение при комнатной температуре

Титановые сплавы различаются по содержанию примесей и механическим свойствам [1]. Прочностные свойства титановых сплавов повышаются, а пластические свойства снижаются с увеличением содержания примесей [1]. Кислород и азот приводят

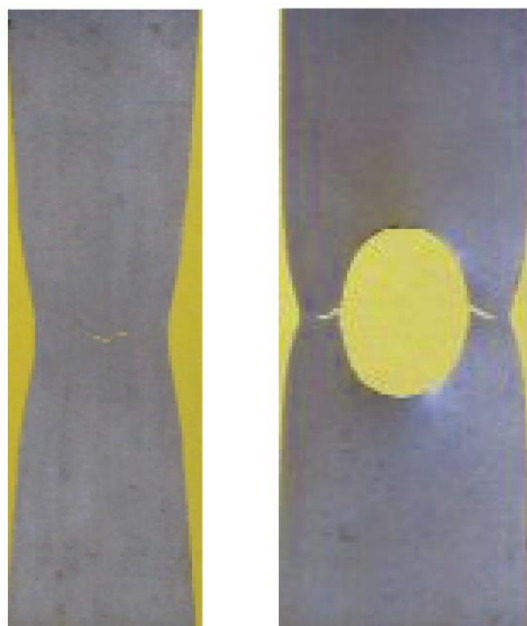
к увеличению предела кратковременной прочности в условиях высокотемпературной ползучести. Титановые сплавы с низким содержанием водорода (менее 0,002 %) сохраняют высокую пластичность до температуры жидкого гелия, и характеризуются конечными или большими предельными деформациями, что означает, что деформация с некоторого момента процесса деформирования оказывается больше 7 % и для описания процесса деформирования следует использовать логарифмическую деформацию (до начального момента влияния шейки на деформацию удлинения).



a

б

Рис. 1. Плоские образцы из титанового сплава VT1–0: сплошные (*a*) и с центральным круглым отверстием (*б*). Размеры: толщина 0,5 мм, рабочая длина 100 мм, ширина 40 мм, диаметр кругового отверстия 20 мм. Удлинение измерялось по положению захватных частей испытательной машины BISS P Ltd. Скорость изменения положения захватных деталей составляла 2 мм/с



a

б

Рис. 2. Изменение формы в момент разрушения для сплошного образца (*a*) и образца с круговым отверстием (*б*). Особенности возникновения магистральных трещин: для сплошного образца (удлинение 33 мм) от центра (*a*) и для образца с концентратором напряжений (удлинение 6,5 мм) от границы отверстия (*б*)

Из сравнения экспериментальных диаграмм, которые получены при одноосном растяжении двух типов прямоугольных пластин, установлено влияние центрального кругового отверстия на предел текучести и предел прочности титанового сплава VT1–0, который проявляет развитые пластические свойства (рис. 1–3) [2]. Центральное круговое отверстие приводит к уменьшению предела прочности σ_s на 10 % и увеличению предела текучести σ_y на 25 %.

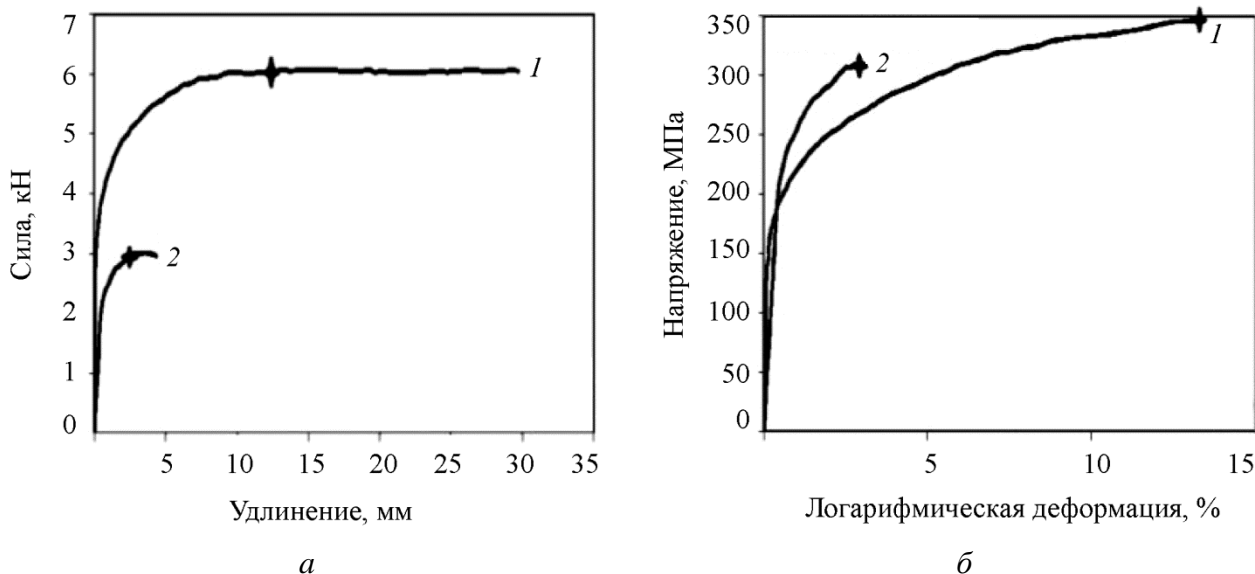


Рис. 3. Зависимость растягивающей силы от удлинения (а) и зависимость истинного напряжения от логарифмической деформации (б). Крестиками обозначен момент начала изменения формы плоских образцов:
1 – сплошные; 2 – с центральным круглым отверстием

Из экспериментальной диаграммы для сплошной прямоугольной пластины следует, что предел текучести $\sigma_y = 180$ МПа и предел прочности $\sigma_s = 384$ МПа, при этом изменение формы начинает развиваться при достижении предела прочности, при котором логарифмическая деформация составляет 13 %. Из экспериментальной диаграммы для плоского образца с центральным круглым отверстием с относительным диаметром 1/2 (диаметр центрального круглого отверстия сопоставим с шириной прямоугольной пластины) установлено, что круговое отверстие приводит к заметному ослаблению прямоугольной пластины, при этом предел прочности $\sigma_s = 311$ МПа достигается при деформации 3 % и наблюдается локальное упрочнение с пределом текучести $\sigma_y = 240$ МПа.

3. Одноосное растяжение при высокой температуре

В статье [3] представлены экспериментальные данные на ползучесть и длительную прочность двух титановых сплавов ВТ5 (структура представлена α -фазой) и ВТ6 (структура представлена $\alpha+\beta$ -фазами), в которых предельные деформации удлинения (в момент времени разрушения) принимали свои конечные (большие) значения. Результаты испытаний [3] получены на цилиндрических образцах в широком диапазоне значений стационарной осевой силы (рис. 4). Среднее предельное удлинение оказалось равным 53 % для титанового сплава ВТ5 (табл. 1). Среднее предельное удлинение для титанового сплава ВТ6 оказалось равным 239 %, что намного больше, чем для титанового сплава ВТ5 при одной и той же высокой температуре 650 °С (табл. 2). Из анализа данных (табл. 1 и 2) следует вывод, что при равных условиях (высокая температура, номинальное напряжение) титановый сплав ВТ5 сопротивляется ползучести лучше, чем титановый сплав ВТ6.

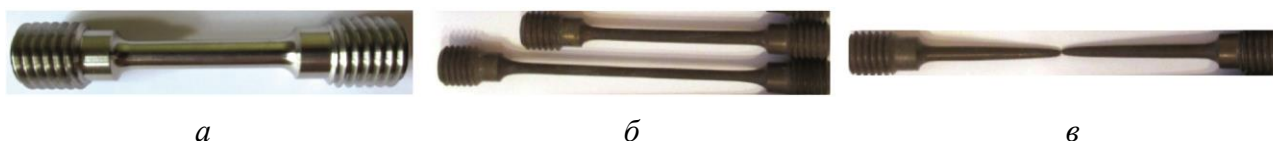


Рис. 4. Цилиндрические образцы диаметром 5 мм и длиной 25 мм: перед испытанием (а) растянуты до двух различных деформированных состояний (б), после разрыва (в)

Таблица 1

Экспериментальные данные для титанового сплава ВТ5 при 650 °С

Номинальное напряжение (МПа)	80	100	120	140	160
Скорость удлинения образца в условиях установившейся ползучести (мм/ч)	0,05	0,29	0,94	2,57	5,88
Время в момент разрушения (ч)	112,2	11,8	9,7	7,4	1,2
Удлинение образца в момент разрушения (мм)	13,6	10,0	16,2	11,1	15,1

Для описания процесса установившейся ползучести и длительной прочности рассматривают две аппроксимации [4, 5] и [6], первая из которых содержит два материальных параметра, вторая [6] – четыре материальных параметра, два из которых принимают физический смысл стартового напряжения ползучести (максимальное напряжение, при котором скорость деформации равна нулю) и предела кратковременной прочности (минимальное напряжение, когда происходит мгновенное разрушение). Визуальный анализ (рис. 5, 6) показывает, что обе зависимости [4, 5] и [6] удовлетворительно аппроксимируют экспериментальные данные (табл. 1 и 2).

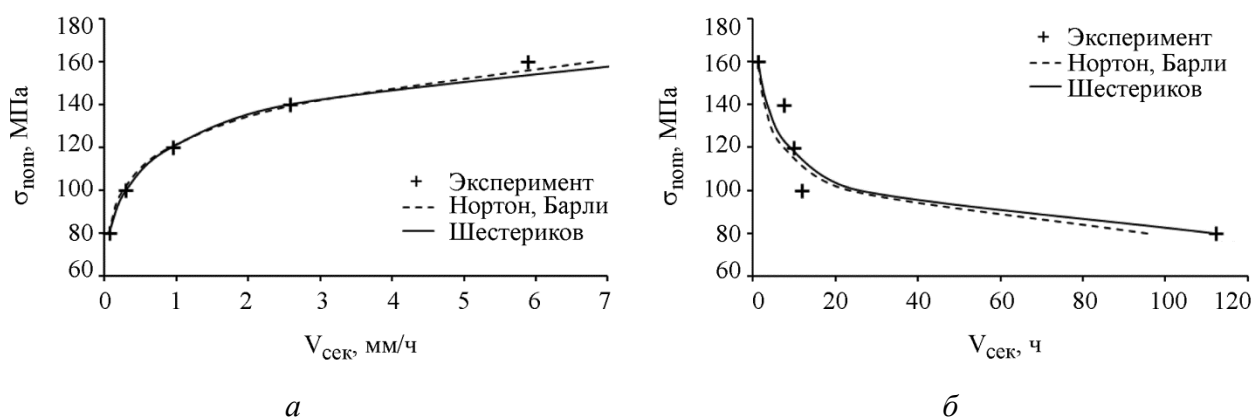


Рис. 5. Зависимости номинального напряжения от скорости удлинения (а) и номинального напряжения от времени в момент разрушения (б) для титанового сплава ВТ5 при 650 °С

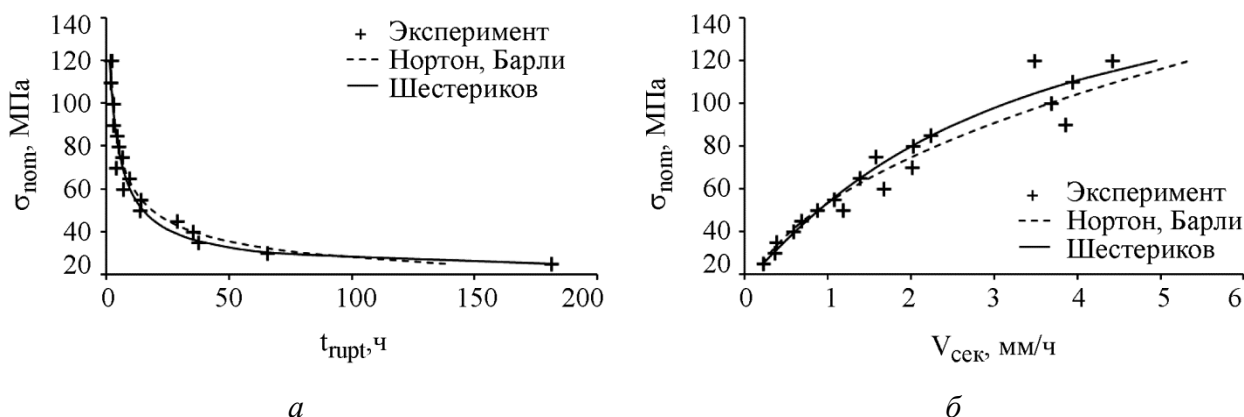


Рис. 6. Зависимости номинального напряжения от скорости удлинения (а) и номинального напряжения от времени в момент разрушения (б) для титанового сплава ВТ6 при 650 °С

Таблица 2

Экспериментальные данные для титанового сплава ВТ6 при 650 °С

	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100	110	120	120
Номинальное напряжение (МПа)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100	110	120	120
Скорость удлинения образца в условиях установившейся ползучести (мм/ч)	0,22	0,34	0,37	0,57	0,66	1,16	1,07	1,67	1,37	2,00	1,57	2,01	2,22	3,85	3,67	3,93	3,47	4,41
Время в момент разрушения (ч)	181,4	65,4	37,2	35,0	28,6	13,5	14,0	6,7	9,0	3,7	6,4	4,8	4,0	2,5	2,5	1,7	2,1	1,4
Удлинение образца в момент разрушения (мм)	51,0	44,2	40,3	47,8	48,2	44,4	44,6	24,9	43,3	16,2	25,0	23,2	25,0	19,6	19,6	14,9	23,3	15,5

В статье [7] приведены кривые ползучести для титанового сплава Ti-600 (структура представлена α -фазой) при 650 °С. Для этой марки титанового сплава увеличение номинального напряжения от 300 до 350 МПа приводит к увеличению предельной деформации от 24 до 38 %. Поскольку отрезок кривой ползучести (зависимость деформации от времени) после времени появления шейки не имеет смысла, для описания процесса ползучести предложен критерий [8] появления шейки, который позволяет определить максимальное значение деформации удлинения до момента времени начала изменения формы, что желательно учитывать при описании процесса ползучести материалов с развитыми вязкими свойствами.

Титановые сплавы, инертные при низких температурах, проявляют высокую химическую активность при нагревании в ряде газовых сред, к которым относятся водород, азот и воздух [1]. Температура нагрева и состав газовой среды оказывают существенное влияние на механические свойства титановых сплавов. При нагреве водород и титан образуют гидрид титана TiH_2 в твердом растворе (в титановом сплаве в твердом состоянии). При температурах выше 320 °С гидрид титана TiH_2 полностью растворяется в титане и переходит в твердый раствор с содержанием водорода до 1,5 %. При охлаждении до 200 °С растворимость водорода в α -фазе титана резко падает. Снижение растворимости особенно велико в температурном диапазоне 100–150 °С. В титановых сплавах при охлаждении ниже этих температур выделяется гидрид TiH_2 . Во время закалки гидрид TiH_2 может выделяться либо в виде высокодисперсных частиц, либо в виде пластин при медленном охлаждении. Диффузия азота в титан при температурах ниже 550 °С протекает медленно, но резко активизируется при 700 °С. Нитрид титана в виде поверхностной пленки образуется при 800–1000 °С. При температурах ниже 300 °С кислород образует химические соединения с титаном вида Ti_3O_5 . При 400–800 °С образуется в основном диоксид титана TiO_2 , а при температуре выше 800 °С обнаруживаются оксиды TiO и Ti_2O_3 . Все эти химические соединения, полученные при нагревании титана в воздушной, азотной и водородной средах и оставшиеся в нем после охлаждения, приводят к заметному снижению предела текучести и предела прочности.

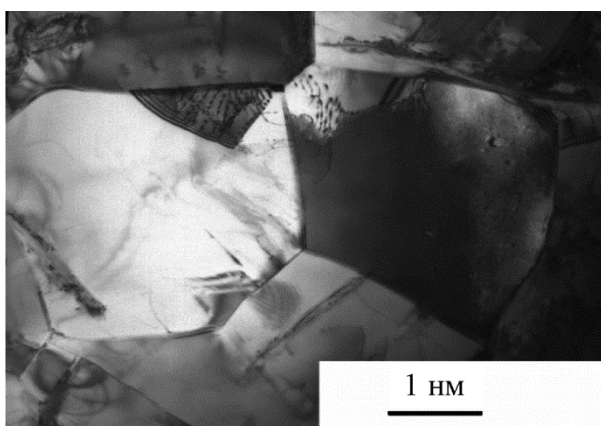
Из анализа скоростей удлинения при установившейся ползучести [9] двух титановых сплавов VT1-0 и VT5 при 400–1050 °С в азоте, воздухе, водороде и гелии следует, что азот и гелий приводят к заметному увеличению скорости удлинения, в то время как водород (при температурах выше 500 °С), наоборот, приводит к снижению скорости удлинения. Тот факт, что водород способен замедлять процесс ползучести в условиях стационарной осевой силы при высокой температуре, наблюдается в экспериментальных данных, полученных для двух титановых сплавов VT6 [10–11] и VT5 [12] при 600 °С. Из анализа экспериментальных данных следует, что концентрация водорода заметно влияет на скорость удлинения при установившейся ползучести и время в момент разрыва (табл. 3). При этом концентрация водорода не оказывает заметного влияния на предельное удлинение (в момент разрушения).

Концентрация водорода 0,1 % по массе для титанового α -сплава VT5 при 600 °С является пограничной, при которой кристаллизация вторичной фазы может произойти, а может и не произойти. Тем не менее, фотоснимки показали нежелательное (так как первоначальная цель заключалась в исследовании влияния водорода на механические характеристики ползучести α -титанового сплава) присутствие β -фазы в образцах с концентрацией водорода 0,1 % по массе [12]. Для структурного анализа брали пробы из области рабочей части на расстоянии 10 мм от места излома (рис. 7).

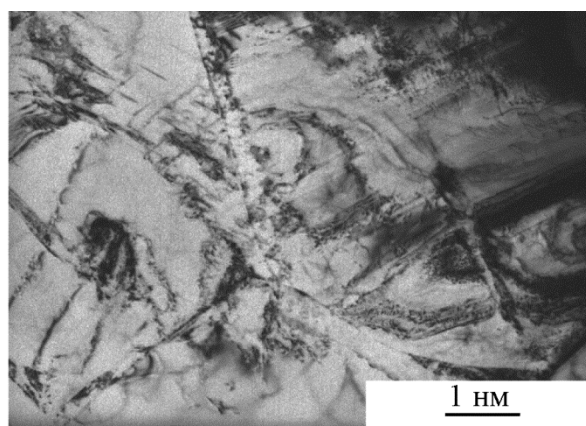
Таблица 3

Экспериментальные данные для титанового сплава ВТ5 при 600 °С
(получены на цилиндрических образцах (рис. 4)
диаметром 5 мм и рабочей длиной 25 мм)

Концентрация водорода, % массы	Номинальное Напряжение, МПа	Скорость удлинения образца в условиях установившейся ползучести, %/ч	Время в момент разрушения, ч	Логарифмическая деформация в момент разрушения образца, %
0,0	150	5,2	4,4	48
0,1		3,6	9,5	53
0,0	225	11,9	1,4	28
0,1		3,8	4,9	30



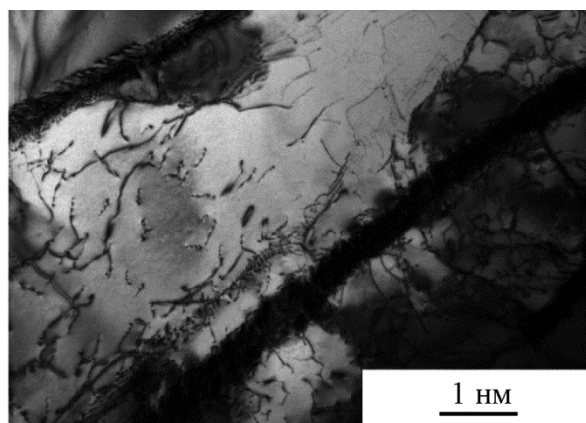
a



б



в



г

Рис. 7. Структуры титанового сплава ВТ5 с концентрацией внедренного водорода 0,1 % по массе: границы α -зерен, где α -зерна имеют яркое поле (*a*), неравномерное содержание β -фазы в слоях α -зерен, где β -фаза имеет темное поле (*б, в*), β -фаза в виде полос, а также кривых линий в виде выхода дислокаций указывает на один из двух возможных механизмов (*г*) осуществления деформации ползучести: способом перемещения дислокаций (механизм 1) и способом проскальзывания границ зерен (механизм 2)

Таким образом, результаты экспериментального исследования показывают, что концентрация водорода 0,1 % по массе приводит к заметному упрочнению α -титанового сплава BT5 в условиях воздействия стационарной растягивающей силы (для усталости возможен противоположный эффект, при котором нестационарная растягивающая сила приведет к ускоренному разрушению образца из наводороженного титанового сплава) (табл. 3). Влияние водорода на механические характеристики и свойства титановых сплавов при меньших концентрациях уже давно исследовано и используется в технологических процессах осадки и штамповки крупногабаритных элементов конструкций, когда предварительное внедрение водорода до малых значений концентрации приводит к увеличению предела текучести, а после завершения технологического процесса водород обратно извлекают из титанового сплава (обратимое легирование водородом титановых сплавов).

4. Кручение и растяжение при высокой температуре

Испытания на одноосное напряжение проводятся с целью определения механических характеристик материала при заданной температуре. Необходимость в испытаниях на сложное напряженное состояние возникает при необходимости либо учитывать анизотропию прочности, либо создать реалистичное напряженное состояние в образце в лаборатории, которое реализуется в элементе конструкции. Под воздействием крутящего момента и осевой растягивающей силы в тонкостенном цилиндрическом образце реализуется сложное напряженное состояние с нормальным напряжением σ и касательным напряжением τ . Под воздействием этих двух напряжений в трубчатом образце реализуются деформация удлинения ε и деформация сдвига γ .

Для описания процесса установившейся ползучести трубчатого образца [13] под действием крутящего момента и осевой силы используют главные напряжения $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ и скорости главных деформаций $\dot{\varepsilon}_1 \geq \dot{\varepsilon}_2 \geq \dot{\varepsilon}_3$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left[\frac{\sigma}{2}\right]^2 + \tau^2}, \quad \sigma_2 = 0, \quad \sigma_3 = \frac{\sigma}{2} - \sqrt{\left[\frac{\sigma}{2}\right]^2 + \tau^2},$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\dot{\varepsilon}}{4} + \sqrt{\left[\frac{3\dot{\varepsilon}}{4}\right]^2 + \left[\frac{\dot{\gamma}}{2}\right]^2}, \quad \dot{\varepsilon}_2 = -\frac{\dot{\varepsilon}}{2}, \quad \dot{\varepsilon}_3 = \frac{\dot{\varepsilon}}{4} - \sqrt{\left[\frac{3\dot{\varepsilon}}{4}\right]^2 + \left[\frac{\dot{\gamma}}{2}\right]^2}, \quad \text{где } \dot{\varepsilon} \neq \dot{\varepsilon}(t) \text{ и } \dot{\gamma} \neq \dot{\gamma}(t)$$

где t – время ползучести, а также $\dot{\varepsilon}$ и $\dot{\gamma}$ – скорости деформации удлинения и деформации сдвига.

Экспериментальные кривые ползучести или зависимости угла поворота от времени (рис. 8) получены для титанового сплава BT1–0 при 550 °C [14] на трубчатых образцах (рис. 9) и приведены при различных значениях отношения σ/τ (табл. 4) для максимального нормального напряжения $\sigma_{\max} = 100$ МПа (эксперименты 1–3) и удвоенного максимального касательного напряжения $2\tau_{\max} = 100$ МПа (эксперименты 4–8), при этом для экспериментов 1–3 (табл. 4) касательное напряжение вычисляли по формуле, где σ/τ – заданная величина (в данной работе принимает значения 1, 2, 3):

$$\tau = \frac{\sigma_{\max}}{2} \left[\sqrt{4 + \left[\frac{\sigma}{\tau}\right]^2} - \frac{\sigma}{\tau} \right], \quad \text{где } \sigma_{\max} = 100 \text{ МПа}$$

для экспериментов 4–8 (табл. 4) касательное напряжение вычисляли по формуле, где σ/τ – заданная величина (в данной работе принимает значения 1, 2, 3):

$$\tau = \frac{2\tau_{\max}}{\sqrt{4 + \left[\frac{\sigma}{\tau}\right]^2}}, \quad \text{где } 2\tau_{\max} = 100 \text{ МПа.}$$

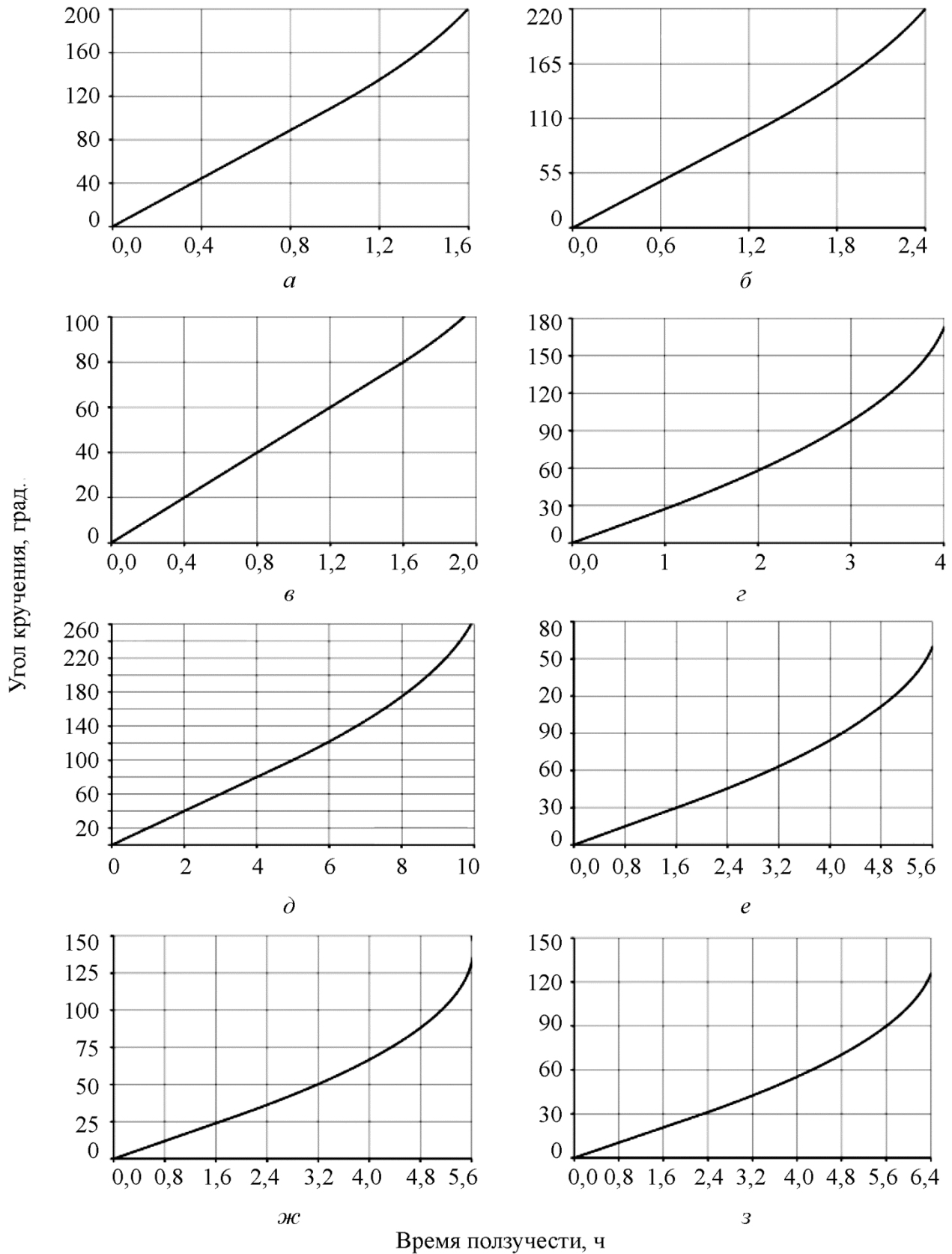


Рис. 8. Зависимости угла поворота от времени ползучести для титанового сплава ВТ1–0 при 550 °С в различных экспериментах: 1 (*a*), 2 (*б*), 3 (*в*), 4 (*г*), 5 (*д*), 6 (*е*), 7 (*ж*), 8 (*з*)



Рис. 9. Трубчатые образцы (внутренний диаметр 14 мм, наружный диаметр 16,1 мм и рабочая длина 130 мм) из титанового сплава ВТ1–0 после испытаний на ползучесть при 550 °С

Таблица 4

Механические характеристики установившейся ползучести для титанового сплава ВТ1–0 при 550 °С

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8
Отношение нормального напряжения к касательному напряжению	1,0	2,0	3,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Нормальное напряжение (МПа)	61,8	82,8	90,8	44,7	60,0	70,7	78,1	83,2
Касательное напряжение (МПа)	61,8	41,4	30,2	44,7	40,0	35,4	31,2	27,7
Скорость удлинения образца в условиях установившейся ползучести (мм/ч)	6,1	9,9	11,0	1,5	1,5	2,1	3,3	3,6
Скорость изменения угла поворота в условиях установившейся ползучести (град/ч)	111	78	50	27	20	19	15	13
Осевая сила (Н)	3066	4110	4508	2219	2977	3509	3875	4129
Крутящий момент (Нм)	21,6	14,6	10,6	15,7	14,0	12,4	10,9	9,7

Визуальный осмотр испытанных образцов (рис. 9) показывает, что образцы в процессе испытаний на ползучесть претерпели изменение формы.

5. Заключение

Экспериментальные данные, полученные для титановых сплавов ВТ1–0, ВТ5 и ВТ6, показали, что эти сплавы проявляют склонность к предельным деформациям значительно больше 7 %. Так, для сплава ВТ1–0 при 20 °С логарифмическая деформация удлинения в момент разрушения составляет 33 %, для сплава ВТ5 при 650 °С средняя деформация ползучести – 13 %, для сплава ВТ6 при 650 °С средняя деформация ползучести – 29 %. Вместе с тем показано, что внедрение водорода в α-титановый сплав ВТ5 при 650 °С и концентрации 0,1 % мас приводит к уменьшению скорости установившейся ползучести от 1,4 до 3,1 раза и увеличению времени в момент разрушения от 2,1 до 3,5 раза, при этом заметного влияния

водорода на предельную деформацию удлинения в момент разрушения не обнаружено. Экспериментальные данные на одновременное кручение и растяжение трубчатых образцов в условиях ползучести показали, что для титанового сплава ВТ1–0 при 550 °С наблюдаются значительные углы поворота от 150 до 260 град при рабочей длине трубчатого образца в недеформированном состоянии 130 мм, при этом увеличение отношения нормального напряжения к касательному приводит к увеличению скорости удлинения и уменьшению скорости угла поворота. Так, при одном и том же значении максимального нормального напряжения, равного 100 МПа, увеличение отношения нормального напряжения к касательному от 1 до 3 приводит к увеличению скорости удлинения в 1,8 раза и уменьшению скорости угла поворота в 2,2 раза. А также при одном и том же значении удвоенного максимального касательного напряжения, равного 100 МПа, увеличение отношения нормального напряжения к касательному от 1 до 3 приводит к увеличению скорости удлинения в 2,4 раза и уменьшению скорости угла поворота в 2,1 раза.

Благодарность

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 20–08–00387).

Литература

1. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – Москва : Изд-во «МИСИС», 2001. – 416 с. – ISBN: 5-87623-027-8.
2. Назаров В. В., Лепешкин А. Р. Особенности формоизменения и разрушения прямоугольной пластины с круговым отверстием // Известия ВолгГТУ. – 2016. – № 2 (181). – С. 75–78.
3. Назаров В. В. Кратковременная ползучесть титановых сплавов ВТ5 и ВТ6 при высокой температуре // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, № 6. – С. 57–60.
4. Norton F. H. Creep of Steel at high temperatures. – New York : Mc. Graw-Hill Book Company, 1929. – 67 p.
5. Bailey R. W. Creep of steel under simple and compound stresses and the use of high initial temperature in steam power plant, Tokyo, 1929 : Trans. World Power Conf. 3, Tokyo Sectional Meeting. – 1929. – P. 1089.
6. Шестериков С. А., Юмашева М. А. Конкретизация уравнения состояния ползучести // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1984. – № 1. – С. 86–92.
7. Creep features of Ti–600 alloy at the temperature of 650°C / Z. Liying, Z. Yongqing, M. Xiaonan, H. Quan, Q. Yunlian // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 941. – P. 995–1003. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.995.
8. Nazarov V. V. Approximation of the creep curve up to the moment of necking. // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2020. – Iss. 3. – P. 61–66. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.3.061-066. – URL: https://dream-journal.org/issues/2020-3/2020-3_116.html
9. Zamaraev L. M., Smirnov S. V. High-temperature short-term creep of the Grade 2 and Ti–5Al titanium alloys under heating in air and helium // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1915. – P. 040069. – DOI: 10.1063/1.5017417.
10. Analysis of the creep and long-term strength of VT6 titanium alloy with preliminarily injected hydrogen / A. M. Lokoshchenko, V. V. Nazarov, A. A. Il'in, A. M. Mamonov // Materials Science. – 2008. – Vol. 44, No. 5. – P. 700–707. – DOI: 10.1007/s11003-009-9128-0.

11. Experimental and theoretical study of the effect of hydrogen on the creep and long-term strength of VT6 titanium alloy / A. M. Lokoshchenko, V. V. Nazarov, A. A. Il'in, A. M. Mamonov // Russian metallurgy (Metally). – 2008. – Vol. 2008, No. 2. – P. 142–147. – DOI: 10.1134/S0036029508020109.
12. Назаров В. В. Влияние водорода на ползучесть и разрушение титановых сплавов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78. – № 12. – С. 59–65.
13. Назаров В. В. Описание установившейся ползучести при растяжении и кручении трубчатых образцов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81. – № 7. – С. 60–61.
14. Назаров В. В. Механические характеристики ползучести титанового сплава ВТ1–0 при растяжении и кручении трубчатых образцов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – № 2. – С. 66–68.