

Оригинальная статья

УДК 620.17:66.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-63-71

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА РАЗРУШЕНИЕ И
МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

© 2024 г. М. О. Кудряшова^{1,2}, С. С. Петров^{1,2}, П. Е. Юдин³, А. Ю. Ежов⁴,
О. С. Бондарева², А. А. Мельников²

¹ООО «Научно-производственный центр «Самара» (Россия, 443022, Самара, Гаражный проезд, 3Б)

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34)

³Самарский государственный технический университет (Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 133)

⁴ООО «КРОНЕ-Автоматика» (Россия, 443004, Самарская обл., Волжский р-н, п. Верхняя Подстепновка, д. 2)

Аннотация. Исследовано влияние наводороживания на характер разрушения и механические характеристики титанового сплава Ti – 6Al – 4V в процессе эксплуатации в водородсодержащей среде при нормальных температурах. Описан основной механизм протекания процесса водородного охрупчивания для титановых сплавов ($\alpha + \beta$)-класса, который заключается в выделении и последующем распаде хрупких гидридных фаз. В ходе исследования установлено, что в процессе работы образцов из рассматриваемого сплава при заданном составе и параметрах эксплуатационной среды происходит насыщение металла водородом, о чем свидетельствует увеличение его содержания в материале после эксплуатации в сравнении с образцом в исходном состоянии. Показан механизм разрушения металла образца, насыщенного водородом в процессе эксплуатации в водородсодержащей среде. Морфология поверхности излома исследуемого образца характерна для хрупкого типа разрушения. На поверхности образца вблизи зоны разрушения присутствуют крупные дефекты в виде кратеров, следы эрозии и растрескивание. Структура излома характеризуется наличием «зубьев пилы», наблюдается обширная система вторичных микротрещин и взаимодействие их с магистральной трещиной, что является характерным проявлением водородного охрупчивания титанового сплава. Вблизи поверхности разрушения образца наблюдается деградация микроструктуры, проявляющаяся в образовании микропустот на границах раздела фаз α/β , инициирующих разрушение. Установлено повышение на 35 – 38 % микротвердости металла части разрушенного образца, непосредственно контактировавшей с рабочей средой, что может быть связано с распределением в рассматриваемой области мелкодисперсных гидридов титана, которые образовались в результате наводороживания металла.

Ключевые слова: титановый сплав, водородная хрупкость, фрактография, микроструктура, механические характеристики

Для цитирования: Кудряшова М.О., Петров С.С., Юдин П.Е., Ежов А.Ю., Бондарева О.С., Мельников А.А. Исследование влияния наводороживания на разрушение и механические характеристики титанового сплава. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):63–71. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-63-71](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-63-71)

Original article

**INFLUENCE OF HYDROGEN ABSORPTION ON DESTRUCTION AND MECHANICAL
CHARACTERISTICS OF TITANIUM ALLOY**

© 2024 M. O. Kudryashova^{1,2}, S. S. Petrov^{1, 2}, P. E. Yudin³, A. Yu. Ezhov⁴, O. S. Bondareva²,
A. A. Mel'nikov²

¹«Research and Production Centre «Samara» LLC (3B, Garazhnyy proyezd, Samara, Samara Region, 443022, Russian Federation)

²Samara National Research University (34, Moskovskoye shosse, Samara, Samara Region, 443086, Russian Federation)

³ Samara State Technical University (133 Molodogvardeyskaya Str., Samara, Samara Region, 443001, Russian Federation)

⁴«KROHNE-Automatics» LLC, (133 Molodogvardeyskaya Str., Samara, Samara Region, 443001, Russian Federation)

Abstract. The effect of hydrogen absorption on the nature of destruction and mechanical characteristics of Ti – 6Al – 4V titanium alloy during operation in a hydrogen-containing medium at normal temperatures has been studied. The main mechanism of the hydrogen embrittlement process for ($\alpha + \beta$) titanium alloys is described, which consists in the separation and subsequent decomposition of brittle hydride phases. In the course of the study, it was established that during the operation of samples from the alloy under the given composition and parameters of the operating environment there is a saturation of the metal with hydrogen, as evidenced by the increase in its content in the material after operation in comparison with the sample in the initial state. The mechanism of destruction of a metal sample saturated with hydrogen during operation in a hydrogen-containing medium is shown. The fracture surface morphology of the investigated specimen is characteristic of brittle fracture type. Large crater-shaped defects, signs of erosion and cracking are present on the surface of the sample near the fracture zone. The fracture structure is characterized by the presence of “saw teeth”, an extensive system of secondary micro-cracks and their interaction with the main crack is observed, which is a characteristic manifestation of hydrogen embrittlement of a titanium alloy. Near the fracture surface of the sample, degradation of the microstructure is observed, manifested in the formation of micro voids at the interface of the α/β phases initiating destruction. An increase in the microhardness of the metal of the part of the destroyed sample that was in direct contact with the working medium was found to be 35-38%, which may be due to the distribution of finely dispersed titanium hydrides in the region under consideration, which were formed as a result of hydrogen absorption of metal.

Keywords: titanium alloy, hydrogen embrittlement, fractography, microstructure, mechanical characteristics

For citation: Kudryashova M.O., Petrov S.S., Yudin P.E., Ezhov A.Yu., Bondareva O.S., Mel'nikov A.A Influence of hydrogen absorption on destruction and mechanical characteristics of titanium alloy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):63–71. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-63-71](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-63-71)

Введение

Титан широко применяется в качестве промышленного конструкционного материала благодаря своим свойствам (высокой прочности, твердости и пластичности в сочетании с малой плотностью). Наиболее распространенными для промышленного применения являются сплавы тройной системы Ti – Al – V, в частности, сплав ($\alpha + \beta$)-класса Ti – 6Al – 4V (марка ВТ6).

Сплавы на основе титана применяют для изготовления оборудования в сфере водородной энергетики. Водород считается одним из наиболее перспективных видов топлива, так как является экологически безопасным и не выделяет вредных веществ при сгорании, благодаря чему имеет большой потенциал для замены традиционных источников энергии. Однако, несмотря на многообещающие перспективы использования водородной энергетики, существует ряд ограничений,

связанных с хранением и транспортировкой водорода, высокая степень опасности которых требует применения надежных материалов.

Для титановых сплавов известна проблема водородного охрупчивания при эксплуатации изделий в водородосодержащих средах при нормальной температуре [1]. Влияние водорода на микроструктуру и механические свойства титановых сплавов при нормальной температуре изучали для сплавов ($\alpha + \beta$)-класса [2 – 7]. Работы [8 – 10] посвящены изучению воздействия водорода на микроструктуру и механические характеристики сплавов α -класса, результаты которых также важны для понимания механизма водородного охрупчивания титановых сплавов. Несмотря на высокую проработанность рассматриваемой тематики в научном сообществе, явление наводороживания титана и его сплавов при нормальных температурах до сих пор оста-

ется актуальной задачей, так как на сегодняшний день нередко именно оно становится основной причиной выхода из строя оборудования на предприятиях водородной энергетики.

Наводороживание титана и его сплавов проявляется в потере пластичности (охрупчивании) материала [11]. В сплавах ($\alpha + \beta$)-класса основной механизм водородного охрупчивания обусловлен выделением и распадом хрупких гидридных фаз, которые оказывают сильное влияние на характер разрушения этих сплавов и ухудшают их механические свойства [12 – 15]. В титановых сплавах ($\alpha + \beta$)-класса степень влияния водорода зависит от соотношения фаз в микроструктуре. Предел растворимости водорода в сплаве повышает β -фаза. При высоком ее содержании в структуре водород преимущественно транспортируется внутри β -решетки и вступает в реакцию с фазой по границам раздела α/β -фаз, где происходит осаждение гидроксида, спровоцированное превышением предела растворимости α -фазы. В таком случае наблюдается серьезная деградация структуры, способствующая охрупчиванию сплава из-за ослабления границ раздела α/β -фаз гидридной фазой [16 – 19].

Целью настоящей работы является анализ влияния наводороживания, протекающего при нормальной температуре, на характер разрушения, микроструктуру и механические свойства титанового сплава системы Ti – 6Al – 4V.

Основными задачами является изучение микроструктуры и механических свойств металла образцов в исходном состоянии и после эксплуатации при нормальной температуре в водородсодержащей среде.

Методы исследования

Объектами исследования являются образцы из титанового сплава системы Ti – 6Al – 4V в исходном состоянии и после эксплуатации в водородсодержащей среде. Эксплуатацию образцов осуществляли на установке производства водорода (УПВ), рабочая среда – водородсодержащий газ (общая доля водорода не менее 99 %), рабочая температура 38 – 40 °С, рабочее давление 2,5 – 2,6 МПа. В процессе эксплуатации произошло разрушение образцов при наработке 29 суток.

Образцы для исследования были изготовлены путем разрезки в продольном направлении необходимых фрагментов с последующей их заливкой в эпоксидную смолу с целью изготовления металлографических шлифов в продольном сечении. Анализ содержания водорода в образцах определяли с помощью спектрометра Титан СЛ. Для выявления микроструктуры металла проводили химическое травление образцов в растворе плавиковой и азотной кислот. Металлографические и электронно-микроскопические исследования проводили с

помощью растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA3 SBH. Для измерения микротвердости использовали микротвердомер ПМТ-3М. Изучение проводили на подготовленных металлографических шлифах в наружной, срединной и внутренней областях сечения фрагмента образца, не контактировавшего с рабочей средой, а также вблизи зоны разрушения на образце, контактировавшем с рабочей средой (нагрузка составляла 50 г).

Основные результаты

По результатам проведенного спектрального анализа установлено, что в металле исходного образца содержание водорода составляет 0,0015 %, что является допустимым значением для сплава Ti – 6Al – 4V в соответствии с ГОСТ 19807 – 91. В образце после эксплуатации содержание водорода не соответствует требованиям ГОСТ 19807 – 91 и достигает 0,017 %, что в 11,3 раза выше, чем в исходном состоянии.

Металлографический анализ образцов из титанового сплава Ti – 6Al – 4V в исходном состоянии показал, что структура основного металла волокнистая, вытянутая в направлении исходной пластической деформации прутковой заготовки. Структура представлена характерной для титанового сплава ($\alpha + \beta$)-класса мелкозернистой глобулярной двухфазной ($\alpha + \beta$)-структурой. Наблюдаются вытянутые пластины α -фазы малого размера (рис. 1, а).

Структура металла после эксплуатации в водородсодержащей среде представлена мелкозернистой глобулярной двухфазной ($\alpha + \beta$)-структурой, вытянутой в направлении исходной пластической деформации. В сравнении с образцами в исходном состоянии структура образцов после эксплуатации имеет более вытянутые и тонкие пластины α -фазы, что является следствием воздействия больших степеней пластической деформации при получении прутковой заготовки (рис. 1, б).

Результаты измерения микротвердости металла титанового сплава системы Ti – 6Al – 4V в исходном состоянии и после эксплуатации в водородсодержащей среде представлены в таблице.

Уровень микротвердости по сечению образца в исходном состоянии изменяется в интервале 238 – 275 HV_{0,05} (в среднем составляет 257 HV_{0,05}). Микротвердость металла после контакта с водородсодержащей средой вблизи зоны разрушения образца составляет в среднем 326 HV_{0,05}, что больше примерно на 38 % в сравнении с металлом, не контактировавшим с рабочей средой. Полученные результаты подтверждают выводы об увеличении микротвердости титанового сплава в результате влияния наводороживания [20].

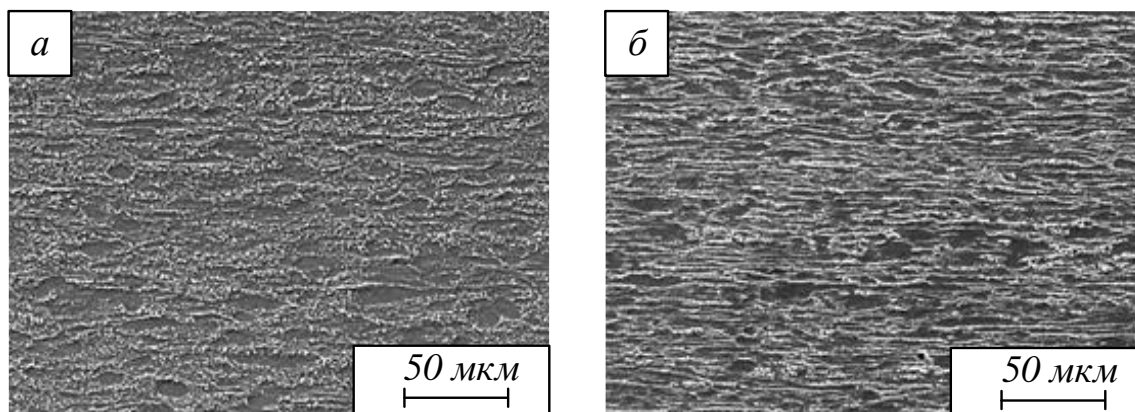


Рис. 1. Микроструктура металла образцов из титанового сплава Ti – 6Al – 4V в исходном состоянии (а) и после эксплуатации (б) (продольное сечение)

Fig. 1. Metal microstructure of samples from titanium alloy of Ti – 6Al – 4V system in initial state (a) and after hydrogen exposure (b) (longitudinal section)

Электронно-микроскопический анализ поверхности образца, разрушенного после эксплуатации в водородсодержащей среде, показал, что вблизи зоны разрушения присутствуют крупные дефекты в виде кратеров, следы эрозии и растрескивание, что характерно для процесса наводороживания титанового сплава [21]. Микрорельеф поверхности излома характерен для хрупкого разрушения и состоит из плоских фасеток с террасным узором, который возник в результате распространения трещины на различных уровнях. Наблюдаются участки со смешанным рельефом, состоящим из фасеток гидридного скола, высоких гребней разрыва и мелких ямок, являющихся пустотами, образовавшимися в результате растрескивания гидридов (рис. 2, а

– з). В работе [19] описан подобный механизм разрушения в результате водородного охрупчивания титана.

Электронно-микроскопические исследования профиля излома показали, что в строении излома присутствуют «зубья пилы», возникающие при водородном охрупчивании титанового сплава [22]. Отчетливо наблюдается ансамбль вторичных трещин и взаимодействие их с магистральной трещиной (рис. 3, а, б). Показана зона перехода от нормальной микроструктуры к микроструктуре, претерпевшей деградацию в результате наводороживания (рис. 3, в). Последняя содержит многочисленные микротрещины, распространяющиеся как по границам раздела α/β -фаз (рис. 3, в),

Результаты замера микротвердости по Виккерсу HV0,05 Vickers HV0.05 microhardness results

Образец	Область измерений	Микротвердость в точке					Среднее значение
		1	2	3	4	5	
В исходном состоянии	Наружная поверхность	296	265	241	303	271	275
	Середина	228	275	215	296	281	259
	Внутренняя поверхность	209	232	257	253	240	238
Разрушенный после эксплуатации (фрагмент образца, не контактировавший с рабочей средой)	Наружная поверхность	227	248	255	220	264	243
	Середина	218	223	245	227	231	229
	Внутренняя поверхность	238	235	215	235	250	235
Разрушенный после эксплуатации (фрагмент образца, контактировавший с рабочей средой)	Вблизи зоны разрушения	340	325	360	313	294	326

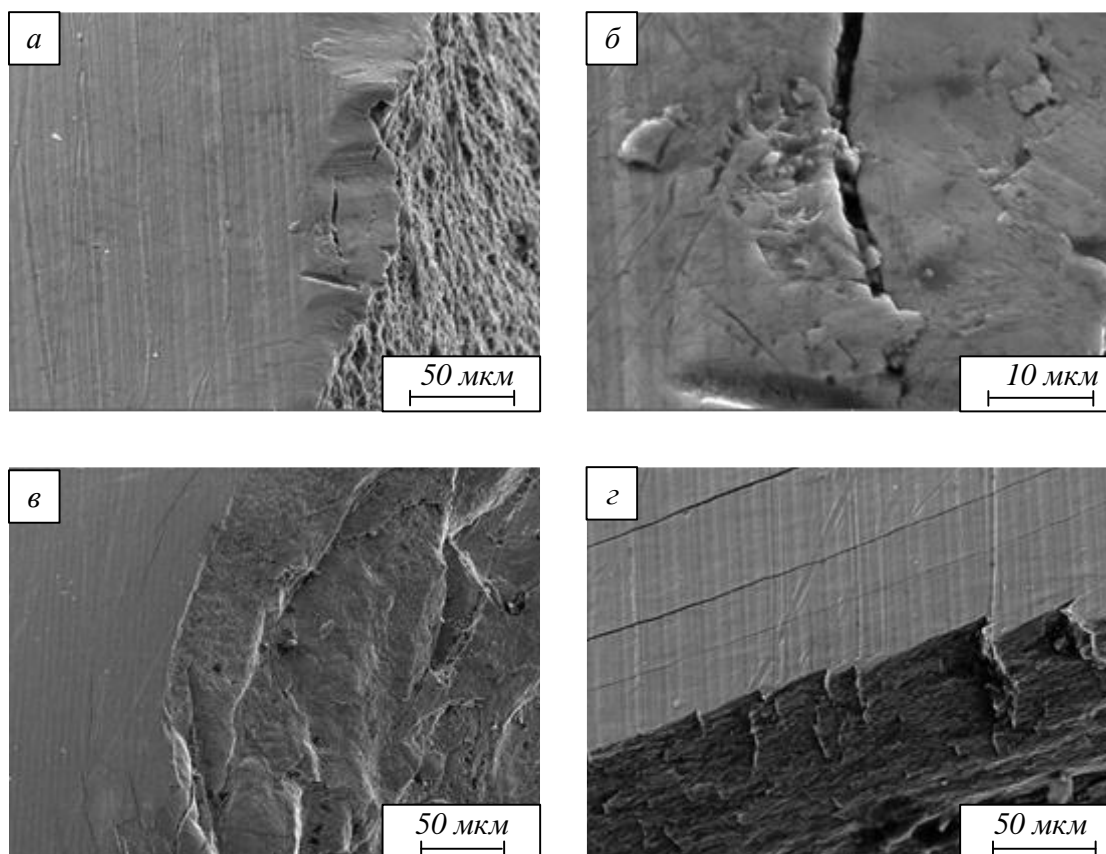


Рис. 2. Дефекты на поверхности образца из титанового сплава системы Ti – 6Al – 4V, разрушенного в процессе эксплуатации в водородсодержащей среде (электронный микроскоп):

a, б – кратеры и следы эрозии; *в, г* – растрескивание

Fig. 2. Defects on the surface of the sample from titanium alloy of Ti – 6Al – 4V system, destroyed after hydrogen exposure (electron microscope):

a, б – craters and traces of erosion; *в, г* – cracking

так и по телу зерен (рис. 3, *з, д*). Кроме того, наблюдаются многочисленные микропустоты, равномерно распределенные вблизи поверхности разрушения (рис. 3, *е*). Микропустоты пролегают вдоль границ раздела α/β -фаз в местах залегания гидридов, которые при воздействии внешней деформации на образец растрескивались, в результате чего образовывались небольшие пустоты по всему объему. По мере роста эти пустоты приводили к образованию микропустот, которые наблюдаются на поверхности излома образца (рис. 2, *а*), являясь концентраторами напряжений, разрушающие образец. Описанный механизм схож с представленным в работе [19] и характерен для проявления водородного охрупчивания.

Выводы

Исследовано влияние наводороживания на микроструктуру, механические характеристики и разрушение металла образцов из титанового сплава Ti – 6Al – 4V. Показано, что при эксплуатации образцов в водородсодержащей среде при нормальных температурах происходит насыщение металла водородом, о чем свидетельствует

увеличение его содержания в металле после эксплуатации в 11,3 раза в сравнении с образцом в исходном состоянии, не контактировавшим с рабочей средой.

По результатам металлографического анализа установлено, что микроструктура металла в исходном состоянии и после эксплуатации представлена мелкозернистой глобулярной двухфазной ($\alpha + \beta$)-структурой с выраженными пластинами α -фазы, вытянутыми в направлении исходной пластической деформации, размер которых изменяется незначительно.

Уровень микротвердости металла после эксплуатации вблизи зоны разрушения после контакта с водородсодержащей средой выше на 38 %, что может быть связано с распределением в рассматриваемой области мелкодисперсных гидридов титана, которые образуются в результате наводороживания.

На поверхности изделия вблизи зоны разрушения присутствуют крупные дефекты в виде кратеров, следы эрозии и растрескивание. Структура излома характеризуется наличием «зубьев пилы», наблюдается обширная система

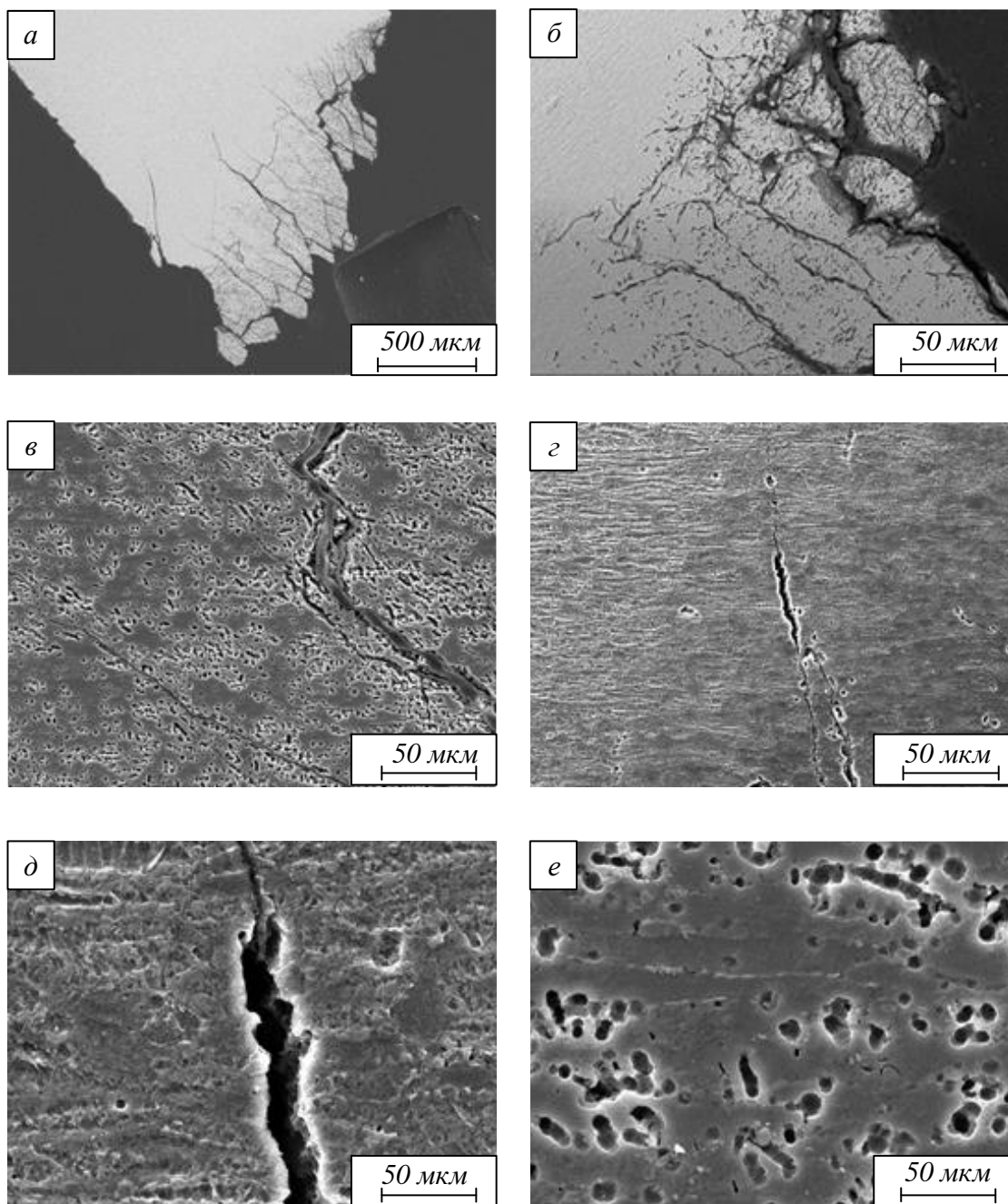


Рис. 3. Профиль излома образца из титанового сплава системы Ti – 6Al – 4V, разрушенного в процессе эксплуатации в водородсодержащей среде (электронный микроскоп)

Fig. 3. Fracture profile of a sample from titanium alloy of Ti – 6Al – 4V system, destroyed as a result of hydrogen exposure (electron microscope)

вторичных микротрещин и взаимодействие их с магистральной трещиной, а также многочисленные микропустоты, пролегающие вдоль границ раздела α/β -фаз, что является проявлением водородного охрупчивания титанового сплава.

Титановый сплав Ti – 6Al – 4V подвержен наводороживанию и, как следствие, водородному охрупчиванию. Это снижает его надежность и эксплуатационные характеристики. Для предотвращения подобных разрушений на производстве необходим тщательный подбор применяемых материалов и проведение предварительных испытаний в модельной среде с целью

снижения риска проявления водородного охрупчивания, значительно сокращающего срок эксплуатации изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Embrittlement of Secondary Hydrogen-Containing Phases in Titanium-Based Alloys. In: *Glass Physics and Chemistry. Proceedings of the Third Russian-Israeli Bi-National Workshop 2004 «The Optimization of the Composition, Structure, and Properties Of Metals, Oxides, Composites, Nanomaterials, and Amorphous Materials»* (St.

- Petersburg, Russia, June 13-23, 2004*). St. Petersburg. 2005;31(1):96–101.
<https://doi.org/10.1007/s10720-005-0029-5>
2. Белова С.Б., Колачев Б.А., Мамонов И.М. Параметры диффузии элементов замещения в α - и β -титане. *Научные труды (Вестник МАТИ)*. 2002;5 (77):5–9.
 3. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. Москва: Наука. 1994:304.
 4. Ильин А.А., Колачев Б.А., Носов В.К., Мамонов А.М. *Водородная технология титановых сплавов*. Москва: МИСИС. 2002:390.
 5. Eliezer D., Tal-Gutelmacher E., Cross C. E., Boellinghaus T. Hydrogen trapping in β -21S titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;421(1–2):200–207.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.067>
 6. Chattoraj I. Stress corrosion cracking (SCC) and hydrogen-assisted cracking in titanium alloys. *Stress Corrosion Cracking*. 2011:381–408.
<https://doi.org/10.1533/9780857093769.3.381>
 7. Gerland M., Lefranc P., Doquet V., Sarrazin-Baudoux C. Deformation and damage mechanisms in an α/β 6242 Ti alloy in fatigue, dwell-fatigue and creep at room temperature. Influence of internal hydrogen. *Materials Science and Engineering A*. 2009;507(1-2):132–143.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.045>
 8. Conforto E., Guillot I., Feaugas X. Solute hydrogen and hydride phase implications on the plasticity of zirconium and titanium alloys: a review and some recent advances. *Philosophical Transactions A*. 2017;375(2098):20160417.
<http://doi.org/10.1098/rsta.2016.0417>
 9. Barkia B. Viscoplasticité à l'ambiante du titane en relation avec ses teneurs en oxygène et hydrogène. Extended abstract of Doctor's thesis. 2014:269.
<http://doi.org/10.13140/RG.2.1.1731.8007>
 10. Wasz M.L., Brotzen F.R., McLellan R.B., Griffin A.J. Effect of oxygen and hydrogen on mechanical properties of commercial purity titanium. *International Materials Reviews*. 2013;41(1):1–12.
<https://doi.org/10.1179/imr.1996.41.1.1>
 11. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Hydrogen cracking in titanium-based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2005;404-406:621–625.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.02.098>
 12. Nelson H.G. Effect of High Temperature Hydrogen on Titanium Base Alloys. *A Publication of The Minerals, Metals & Materials Society*. 1996:699.
 13. Feaugas X., Conforto E. Influence de l'hydrogène sur les mécanismes de déformation et d'endommagement des alliages de titane et de zirconium. *PlastOx*. 2009:161–178.
<https://doi.org/10.1051/ptox/2009012>
 14. Bignon Q., Martin F., Auzoux Q., Wouters Y. Hydrogen impact on the mechanical properties of three titanium alloys. In: *3rd International conference on metals and hydrogen*. Gand, Belgium. 2018:11.
 15. Малков И.Л., Бойцов И.Е., Дмитриенко А.Н., Казимов М.В., Клевцов В.Г., Туманова Н.Ю., Юхимчук А.А. Исследование водородной прочности титановых сплавов. *Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ*. 2020;25–2:170–179. EDN:IVVRPB;
https://doi.org/10.53403/9785951504944_2020_25.2_170_179
 16. Pittinato G.F., Hanna W.D. Hydrogen in β transformed Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1972; 3(11):2905–2909.
 17. Hardie D., Ouyang S. Effect of hydrogen and strain rate upon the ductility of mill-annealed Ti6Al4V. *Corrosion Science*. 1999;41(1):155–177.
[https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00109-7)
 18. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Hydrogen-assisted degradation of titanium based alloys. *Materials Transactions*. 2004;45(5):1594–1600.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.45.1594>
 19. Briant C.L., Wang Z.F., Chollocoop N. Hydrogen embrittlement of commercial purity titanium. *Corrosion Science*. 2002;44(8):1875–1888.
[https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00159-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00159-7)
 20. Молоканова А.А., Саулин Д.В. Исследование процессов наводороживания коррозионно-стойких сплавов и сплавов цветных металлов. *Вестник ПНИПУ*. 2023;4:92–107.
<https://doi.org/10.15593/2224-9400/2023.4.07>
 21. Чернов И.П., Лидер А.М., Черданцев Ю.П., Гаранин Г.В., Никитенков Н.Н., Кренинг М., Сурков А.С. Дефекты в титане, инициированные водородом. *Физическая мезомеханика*. 2000;3(6):97–103. EDN: KWPJCB.
 22. Винокур Б.И., Белов С.П., Брун М.Я. Титановые сплавы. *Металловедение титана и его сплавов*. Москва: Металлургия. 1992:352.

REFERENCES

1. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Embrittlement of Secondary Hydrogen-Containing Phases in Titanium-Based Alloys. In: *Glass Physics and Chemistry. Proceedings of the Third Russian-Israeli Bi-National Workshop 2004 «The Optimization of the Composition, Structure, and Properties Of Metals, Oxides, Composites, Nanomaterials, and Amorphous Materials»* (St. Petersburg, Russia, June 13–23, 2004). St. Petersburg. 2005;31(1):96–101.
<https://doi.org/10.1007/s10720-005-0029-5>

2. Belova S.B., Kolachev B.A., Mamonov I.M. Diffusion parameters of substitution elements in α - and β -titanium. *Nauchnye trudy (Vestnik MATI)*. 2002;5(77):5–9. (In Russ.).
3. Il'in A.A. *The mechanism and kinetics of phase and structural transformations in titanium alloys*. Moscow: Nauka. 1994:304. (In Russ.).
4. Il'in A.A., Kolachev B.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. *Hydrogen technology of titanium alloys*. Moscow: MISIS. 2002:390. (In Russ.).
5. Eliezer D., Tal-Gutelmacher E., Cross C. E., Boellinghaus T. Hydrogen trapping in β -21S titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;421(1–2):200–207. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.067>
6. Chatteraj I. Stress corrosion cracking (SCC) and hydrogen-assisted cracking in titanium alloys. *Stress Corrosion Cracking*. 2011:381–408. <https://doi.org/10.1533/9780857093769.3.381>
7. Gerland M., Lefranc P., Doquet V., Sarrazin-Baudoux C. Deformation and damage mechanisms in an α/β 6242 Ti alloy in fatigue, dwell-fatigue and creep at room temperature. Influence of internal hydrogen. *Materials Science and Engineering A*. 2009;507(1–2):132–143. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.045>
8. Conforto E., Guillot I., Feaugas X. Solute hydrogen and hydride phase implications on the plasticity of zirconium and titanium alloys: a review and some recent advances. *Philosophical Transactions A*. 2017;375(2098):20160417. <http://doi.org/10.1098/rsta.2016.0417>
9. Barkia B. Viscoplasticité à l'ambiance du titane en relation avec ses teneurs en oxygène et hydrogène. Extended abstract of Doctor's thesis. 2014:269. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.1731.8007>
10. Wasz M.L., Brotzen F.R., McLellan R.B., Griffin A.J. Effect of oxygen and hydrogen on mechanical properties of commercial purity titanium. *International Materials Reviews*. 2013;41(1):1–12. <https://doi.org/10.1179/imr.1996.41.1.1>
11. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Hydrogen cracking in titanium-based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2005;404–406:621–625. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.02.098>
12. Nelson H.G. Effect of High Temperature Hydrogen on Titanium Base Alloys. *A Publication of The Minerals, Metals & Materials Society*. 1996:699.
13. Feaugas X., Conforto E. Influence de l'hydrogène sur les mécanismes de déformation et d'endommagement des alliages de titane et de zirconium. *PlastOx*. 2009:161–178. <https://doi.org/10.1051/ptox/2009012>
14. Bignon Q., Martin F., Auzoux Q., Wouters Y. Hydrogen impact on the mechanical properties of three titanium alloys. In: *3rd International conference on metals and hydrogen*. Gand, Belgium. 2018:11.
15. Malkov I.L., Boitsov I.E., Dmitrienko A.N., Kazimov M.V., Klevtsov V.G., Tumanova N.Yu., Yukhimchuk A.A. Investigation of the hydrogen strength of titanium alloys. *Trudy RFYaTs-VNIIEF*. 2020;25–2:170–179. EDN:IVVRPB; (In Russ.). https://doi.org/10.53403/9785951504944_2020_25.2_170_179
16. Pittinato G.F., Hanna W.D. Hydrogen in β transformed Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1972; 3(11):2905–2909.
17. Hardie D., Ouyang S. Effect of hydrogen and strain rate upon the ductility of mill-annealed Ti6Al4V. *Corrosion Science*. 1999;41(1):155–177. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00109-7)
18. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Hydrogen-assisted degradation of titanium based alloys. *Materials Transactions*. 2004;45(5):1594–1600. <https://doi.org/10.2320/matertrans.45.1594>
19. Briant C.L., Wang Z.F., Chollocoop N. Hydrogen embrittlement of commercial purity titanium. *Corrosion Science*. 2002;44(8):1875–1888. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00159-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00159-7)
20. Molokanova A.A., Saulin D.V. Investigation of the processes of hydrogenation of corrosion-resistant alloys and non-ferrous metal alloys. *Vestnik PNIPU*. 2023;4:92–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2023.4.07>
21. Chernov I.P., Lider A.M., Cherdantsev Yu.P., Garanin G.V., Nikitenkov N.N., Krening M., Surkov A.S. *Defects in titanium initiated by hydrogen*. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2000;3(6):97–103. EDN: KWPJCB. (In Russ.).
22. Vinokur B.I., Belov S.P., Brun M.Ya. *Titanium alloys*. *Metallurgy of titanium and its alloys*. Moscow: Metallurgiya. 1992:352. (In Russ.).

Сведения об авторах

Мария Олеговна Кудряшова, младший научный сотрудник, ООО «Научно-производственный центр «Самара», аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: dmitrieva@npcsamara.ru
ORCID: 0000-0002-4874-9278
SPIN-код: 1135-1380

Сергей Степанович Петров, к.ф.-м.н., начальник Аналитического отдела, ООО «Научно-производственный центр «Самара», доцент кафедры физики твердого тела и неравновесных систем, Самарский

национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: petrov@npcsamara.ru
ORCID: 0009-0001-4011-0058
SPIN-код: 1094-4110

Павел Евгеньевич Юдин, к.т.н., доцент, директор по науке, ООО «Научно-производственный центр «Самара», доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет
E-mail: yudin@npcsamara.ru
ORCID: 0000-0002-4517-3744
SPIN-код: 3901-0458

Александр Юрьевич Ежов, главный конструктор, ООО «КРОНЕ-Автоматика»
E-mail: ejovvkb@yandex.ru

Ольга Сергеевна Бондарева, к.т.н., доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: bondareva.os@ssau.ru
ORCID: 0000-0002-4273-2483
SPIN-код: 8308-0326

Алексей Александрович Мельников, к.т.н., доцент, доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: melnikov.alex@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-1953-3670
SPIN-код: 7359-3564

Information about the authors

Mariya O. Kudryashova, Junior Researcher, «Research and Production Centre «Samara» LLC, postgraduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University
E-mail: dmitrieva@npcsamara.ru
ORCID: 0000-0002-4874-9278
SPIN-код: 1135-1380

Sergei S. Petrov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Analytical Department, «Research and Production Centre

«Samara» LLC, Associate Professor of the Department of Solid State Physics and Nonequilibrium Systems, Samara National Research University
E-mail: petrov@npcsamara.ru
ORCID: 0009-0001-4011-0058
SPIN-код: 1094-4110

Pavel E. Yudin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of Science, «Research and Production Centre «Samara» LLC, Associate Professor of the Department «Metal science, powder metallurgy, nanomaterials», Samara State Technical University
E-mail: yudin@npcsamara.ru
ORCID: 0000-0002-4517-3744
SPIN-код: 3901-0458

Aleksandr Yu. Ezhov, Chief Designer, «KROHNE-Automatics» LLC
E-mail: ejovvkb@yandex.ru

Ol'ga S. Bondareva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University
E-mail: bondareva.os@ssau.ru
ORCID: 0000-0002-4273-2483
SPIN-код: 8308-0326

Aleksei A. Mel'nikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University
E-mail: melnikov.alex@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-1953-3670
SPIN-код: 7359-3564

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 05.04.2024
После доработки 24.04.2024
Принята к публикации 06.05.2024

Received 05.04.2024
Revised 24.04.2024
Accepted 06.05.2024