

Научная статья

УДК 543.42:546.11

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-76-84

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАВОДОРОЖИВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ТИПА VT5, VT14, VT22 ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА

А.Н. Швецова¹, С.Г. Ерошкин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Необходимость обеспечения высокого качества титановых сплавов требует разработки новых стандартных образцов содержания водорода, выбора марки материала для их изготовления и способа наводороживания. Исследованы процессы насыщения водородом образцов из титановых сплавов типа VT5, VT14 и VT22 электрохимическим способом (катодное наводороживание). Изучены степень насыщения водородом образцов из сплавов типа VT5, VT14 и VT22, а также влияние выравнивающего отжига на содержание доли β -фазы в образцах из сплава типа VT14. Содержание водорода измеряли с помощью эмиссионного спектрального анализа.

Ключевые слова: определение водорода, катодное наводороживание, спектральный метод анализа, стандартные образцы, водород в титане

Для цитирования: Швецова А.Н., Ерошкин С.Г. Исследование процесса наводороживания титановых сплавов типа VT5, VT14, VT22 для изготовления стандартных образцов содержания водорода // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-76-84.

Scientific article

STUDY OF THE HYDROGENATION PROCESS OF VT5, VT14, VT22 TITANIUM ALLOYS FOR THE PRODUCTION OF STANDARD SAMPLES OF HYDROGEN CONTENT

A.N. Shvetsova¹, S.G. Eroshkin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Ensuring high quality of titanium alloy production dictates the development of new standard samples for hydrogen content, selection of the grade of material for their manufacture and the method of hydrogenation. In this work, the processes of hydrogen saturation of VT5, VT14 and VT22 titanium alloy samples by the electrochemical method (cathodic hydrogenation) have been studied. The paper provides the results of analysis of the degree of hydrogen saturation of the VT5, VT14 and VT22 samples, as well as the effect of the leveling annealing on the content of the β -phase fraction in the VT14 alloy samples. Hydrogen content has been measured using the emission spectral analysis.

Keywords: hydrogen determination, cathodic hydrogenation, spectral analysis method, standard samples, hydrogen in titanium

For citation: Shvetsova A.N., Eroshkin S.G. Study of the hydrogenation process of VT5, VT14, VT22 titanium alloys for the production of standard samples of hydrogen content. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-76-84.

Введение

Титановые сплавы широко применяются в авиапромышленности [1, 2], так как обладают уникальными свойствами, которые позволяют решать задачи, связанные с повышенным требованием к прочности, легкости и долговечности авиационных конструкций. Титановые сплавы используются для изготовления силовых конструкций [3–6], таких как фюзеляж, элементы крыльев и лопатки турбин. Для обеспечения заявленных эксплуатационных свойств конструкции необходимо обеспечить качество исходных полуфабрикатов титановых сплавов. Для этого применяют различные виды испытаний и контроля материала, включая контроль содержания водорода, так как при повышенных значениях этого показателя может происходить водородное охрупчивание. Для контроля содержания водорода используется спектральный эмиссионный анализ. При спектральном определении водорода необходимо применять стандартные образцы, охватывающие широкий диапазон концентраций – от тысячных до десятых долей процента. В данной статье рассмотрен вопрос выбора материала для изготовления стандартных образцов для спектрального анализа.

Выбор материала для изготовления стандартных образцов массовой доли водорода в титане является важным этапом, обеспечивающим точность результатов измерений. Количество водорода в материале должно обеспечивать построение градуировочных зависимостей. Материал должен обладать структурной стабильностью и однородным распределением водорода по объему образца.

Фазовый состав титановых сплавов, оказывающий значительное влияние на процесс наводороживания, включает низкотемпературную α -фазу с гексагональной плотноупакованной решеткой, стабильную до температуры 882,5 °С; высокотемпературную β -фазу с объемноцентрированной кубической решеткой и в некоторых случаях другие промежуточные фазы. Эти фазы обладают различными физико-химическими свойствами, в частности растворимость водорода в β -фазе значительно больше, чем в α -фазе. По этой причине титановые сплавы с β - или ($\alpha + \beta$)-структурой с достаточно большим количеством β -фазы больше склонны к поглощению водорода [7].

В работе [8] насыщали водородом α -сплав ВТ1-1, псевдо- α -сплав ОТ4-1 и ($\alpha + \beta$)-сплав ВТ14, содержащие 0,002 % остаточного водорода. Образцы из титановых сплавов длиной 100 мм, диаметром 14 мм травили в растворе соляной кислоты в присутствии фтористого аммония в течение 3 ч при температуре 50 °С. Концентрация водорода в сплавах ВТ1-1 и ОТ4-1 после травления в течение 15 мин увеличилась до 0,010 %, при дальнейшем травлении осталась неизменной. Концентрация водорода в сплаве ВТ14 увеличилась пропорционально продолжительности травления и через 3 ч достигла 0,048 %.

Изменения микроструктуры и фазового состава, распределение водорода, упрочняющий эффект при циклическом наводороживании титановых сплавов описаны в работах [9, 10]. В работе [10] наводороживали технический титан и β -сплав состава Ti–15V–3Al–3Cr–3Sn, процесс проводили в 1 н H₂SO₄ с добавлением 0,1 г/л As₂O₃ при плотности катодного тока 5 мА/см² в течение 3 ч. Распределение водорода по глубине после наводороживания было более однородным у β -сплава состава Ti–15V–3Al–3Cr–3Sn, чем у технического титана, относящегося к α -сплавам.

Данная статья посвящена исследованию процесса наводороживания различных марок титановых сплавов типа ВТ5, ВТ14 и ВТ22 электрохимическим способом (катодная поляризация). Цель работы – изучение степени насыщения водородом образцов из сплавов типа ВТ5, ВТ14 и ВТ22 для дальнейшего выбора марки материала, подходящего для изготовления стандартных образцов с наиболее однородным распределением водорода.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Атомарный водород, выделяющийся при растворении титановых сплавов в кислотных растворах, вначале адсорбируется поверхностью, затем проникает вглубь металла и адсорбируется им. Количество водорода и глубина его проникновения зависят от многих факторов и в большей мере определяются фазовым составом сплава.

Склонность к наводороживанию титановых сплавов при травлении схематично показана на рис. 1 [11]. Количество водорода и глубина его проникновения в поверхностный слой металла возрастают по мере легирования β -стабилизирующими элементами, т. е. с увеличением содержания в структуре β -фазы.

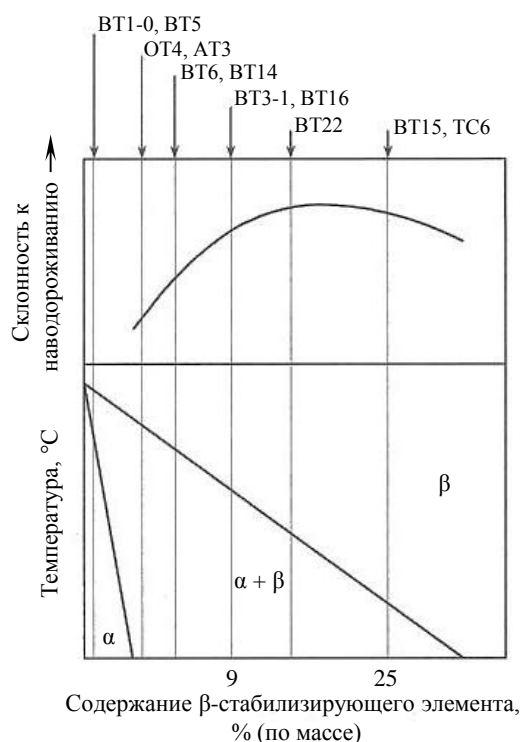


Рис. 1. Изменение склонности к наводороживанию титановых сплавов при различном содержании β -фазы [11]

Поглощение водорода сплавами на основе α -фазы наименьшее. Следует отметить, что максимальное наводороживание достигается сплавами на основе α -фазы, содержащими небольшое количество β -фазы, как, например, сплавом VT22. У сплавов с исключительно β -структурой склонность к наводороживанию меньше.

Согласно исследованию [12], посвященному влиянию фазового состава титановых сплавов VT3-1, VT22, VT14 на глубину проникновения при травлении и поведение водорода в металле при вылеживании сплава, наиболее склонна к поглощению β -фаза, особенно метастабильная.

Метастабильные фазы мартенситного типа (α' , α''), фиксируемые при закалке из β -области, способствуют интенсификации наводороживания сплавов с проникновением водорода на большую глубину [13]. При наводороживании ($\alpha + \beta$)-сплавов происходит не только изменение параметров решетки, но и увеличение содержания β -фазы. Водород насыщает имеющуюся в сплаве β -фазу и дополнительно стабилизирует небольшое количество β -фазы. Последняя образуется в областях вблизи границы раздела α -и β -фаз.

В связи с изложенным для проверки влияния фазового состава на степень поглощения водорода и равномерность его распределения принято решение насыщать

водородом сплавы α -класса (типа BT5), ($\alpha + \beta$)-класса (типа BT14) и переходного класса (типа BT22). Сплав BT22 отличается наибольшим содержанием β -фазы по сравнению с двумя другими представленными марками.

Степень насыщения титановых сплавов водородом также зависит от величины зерна в металле: чем мельче зерно, тем выше степень наводороживания. Неоднородность зернистой структуры материала может привести к неоднородности распределения водорода после насыщения как в объеме одного образца, так и между образцами. Поэтому перед наводороживанием проведен выравнивающий отжиг образцов из сплава типа BT14 при температуре 830 °С в течение 3 ч с охлаждением на воздухе для получения равномерного зерна и сохранения β -фазы [14]. Образцы из сплавов типа BT5 и BT22 подобному отжигу не подвергали, чтобы оценить степень влияния на фазовый состав и однородность распределения водорода по материалу.

Водородом насыщали образцы (длиной 120 мм и диаметром 12 мм) из сплавов типа BT14, BT22 и BT5. Из сплавов каждой марки получено по шесть образцов. Все образцы отобраны от одной плавки, химический состав исследуемых образцов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав образцов из сплавов типа BT14, BT22 и BT5 [15]

Тип сплава	Содержание элемента, % (по массе)							
	Al	Mo	V	Fe	Si	Zr	Cr	Mn
BT14	5,50	4,34	1,65	0,56	0,20	0,08	–	–
BT5	5,31	0,74	–	0,30	0,13	–	1,60	1,10
BT22	3,92	4,90	4,80	0,85	0,18	0,30	0,86	–

Электрохимическое наводороживание образцов из титанового сплава проводили путем подвода электрического тока к смеси кислот для травления. В результате происходило выделение водорода на катоде, которым является титановый образец.

Одним из преимуществ данного способа является то, что процесс насыщения водородом более управляемый по сравнению с методом химического травления [16, 17], поскольку позволяет регулировать такие параметры, как температура, плотность тока, продолжительность.

Для получения раствора электролита использовали реактивы следующей квалификации:

- натрий серноокислый (х.ч.) в концентрации 20 г/л;
- серная кислота (х.ч., плотность 1,83 г/см³) в концентрации 5 мл/л;
- ортофосфорная кислота (х.ч., плотность 1,71 г/см³) в концентрации 5 мл/л;
- вода дистиллированная (ГОСТ Р 58144–2018).

Температура обработки составила 25 °С, напряжение постоянного тока: 8 В.

Продолжительность травления варьировали от 15 до 180 мин, катод – наводороживаемый образец, анод изготовлен из инертного материала (графит).

Перед загрузкой в электрохимическую ячейку образцы травили (декапировали) в растворе следующего состава:

- азотная кислота (х.ч., плотность 1,4 г/см³) в концентрации 200 мл/л;
- фтористоводородная кислота (х.ч., плотность 1,123 г/см³) в концентрации 20 мл/л;
- вода дистиллированная (ГОСТ Р 58144–2018).

Температура раствора составила 25 °С, продолжительность травления: 5 мин.

В процессе наводороживания происходило интенсивное выделение газа с одинаковой на протяжении всего эксперимента интенсивностью. По окончании процесса поверхность образцов визуально осталась прежней, шероховатость, размеры и масса образцов не изменились.

Для обеспечения равномерности распределения водорода по всему объему образцы из сплава типа ВТ14 после насыщения также подвергли дополнительному выравнивающему отжигу в течение 100 ч при температуре 500 °С. Образцы из сплавов типа ВТ5 и ВТ22 дополнительной термообработке не подвергали.

Для установления содержания водорода в образцах применяли методы спектрального анализа с использованием эмиссионного спектрометра «Титан СЛ», настроенного на регистрацию линии водорода 656,279 нм. Применение метода эмиссионного спектрального анализа позволяет определить содержание водорода в титановых сплавах с пределом обнаружения от 0,0010 % (по массе). Принцип определения содержания водорода в титане основан на измерении интенсивности излучения линии водорода в спектре, возбужденном конденсированной искрой высокой мощности с образованием ионизированной плазмы. Излучение ионизированной плазмы через оптоволокно поступает в полихроматор, где разлагается в спектр дифракционной решеткой. Далее спектр регистрируется электронной системой с CCD-детекторами (Charge Couple Device), передается в компьютер и обрабатывается с выдачей результата измерения.

Результаты и обсуждение

В табл. 2 представлено исходное содержание водорода в образцах до наводороживания. Из полученных данных можно сделать вывод, что начальное содержание водорода неодинаково. Если для ($\alpha + \beta$)-сплава типа ВТ14 и сплава переходного класса типа ВТ22 содержание водорода находится в диапазоне от 0,0017 до 0,0035 % (по массе), то для α -сплава типа ВТ5 этот показатель в ~ 3 раза больше и составляет 0,0074–0,0095 % (по массе). Содержание водорода в сплаве типа ВТ5 находится в допустимых пределах в соответствии с нормативной документацией [15] (до 0,015 % (по массе)), но является слишком высоким, что в дальнейшем может создать трудности при изготовлении комплекта стандартных образцов содержания водорода. Поскольку для создания комплекта необходимы образцы с различным содержанием водорода, то образцы из сплава типа ВТ5 необходимо подвергать обезводороживающему отжигу и только потом насыщать водородом, чтобы получить образец с низкой концентрацией водорода (0,002–0,0025 % (по массе)).

Таблица 2

Исходное содержание водорода в образцах из сплавов типа ВТ5, ВТ14 и ВТ22

Тип сплава	Содержание водорода, % (по массе), в образце					
	1	2	3	4	5	6
ВТ5	0,0091	0,0094	0,0093	0,0095	0,0078	0,0074
ВТ14	0,0018	0,0017	0,0018	0,0019	0,0019	0,0019
ВТ22	0,0035	0,0032	0,0030	0,0033	0,0033	0,0035

После насыщения водородом наблюдается незначительное увеличение концентрации водорода в образцах из сплава типа ВТ5, по сравнению с которыми образцы из сплавов типа ВТ14 и ВТ22 имеют бóльшую степень наводороживания (табл. 3). Наводороживание данных образцов происходит постепенно с резким увеличением концентрации водорода при травлении в течение 180 мин. Для образцов из сплава типа ВТ14 концентрация водорода после травления в течение 120 и 180 мин различается в 7,5 раза, для образцов из сплава типа ВТ22 – в 2,8 раза. Следует отметить, что образец из сплава типа ВТ22 после травления в течение 180 мин содержит наибольшее количество водорода (0,2392 % (по массе)). Это свидетельствует о возможности применения данного типа сплава для изготовления стандартных образцов с высоким содержанием водорода. Кроме того, наблюдается четкая зависимость концентрации водорода от продолжительности травления.

Таблица 3

**Содержание водорода в образцах из сплавов типа VT5, VT14 и VT22
после насыщения электрохимическим способом**

Тип сплава	Содержание водорода, % (по массе), при продолжительности травления, мин					
	15	30	60	90	120	180
VT5	0,0092	0,0105	0,0112	0,0122	0,0128	0,0125
VT14	0,0023	0,0035	0,0044	0,0054	0,0170	0,1270
VT22	0,0045	0,0071	0,0095	0,0806	0,0837	0,2392

Для оценки влияния выравнивающего отжига при температуре 830 °С в течение 3 ч на содержание β -фазы выполнен рентгеноструктурный анализ образцов из титанового сплава типа VT14 в исходном состоянии и после обработки. Дифрактограммы регистрировали на рентгеновском дифрактометре в монохроматическом $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении в геометрии Брэгга–Брентано. Расшифровка дифрактограмм проведена с помощью специализированной программы и структурной базы данных. Рентгеновскую съемку проводили в диапазоне углов $2\theta = 30\text{--}145$ градусов.

Фазовый состав образцов идентичен: α -Ti с гексагональной плотноупакованной решеткой и β -Ti с объемноцентрированной кубической решеткой (рис. 2). Дополнительных фаз не выявлено. В табл. 4 представлены результаты расчета периодов и микродеформации решеток фаз α -Ti и β -Ti.

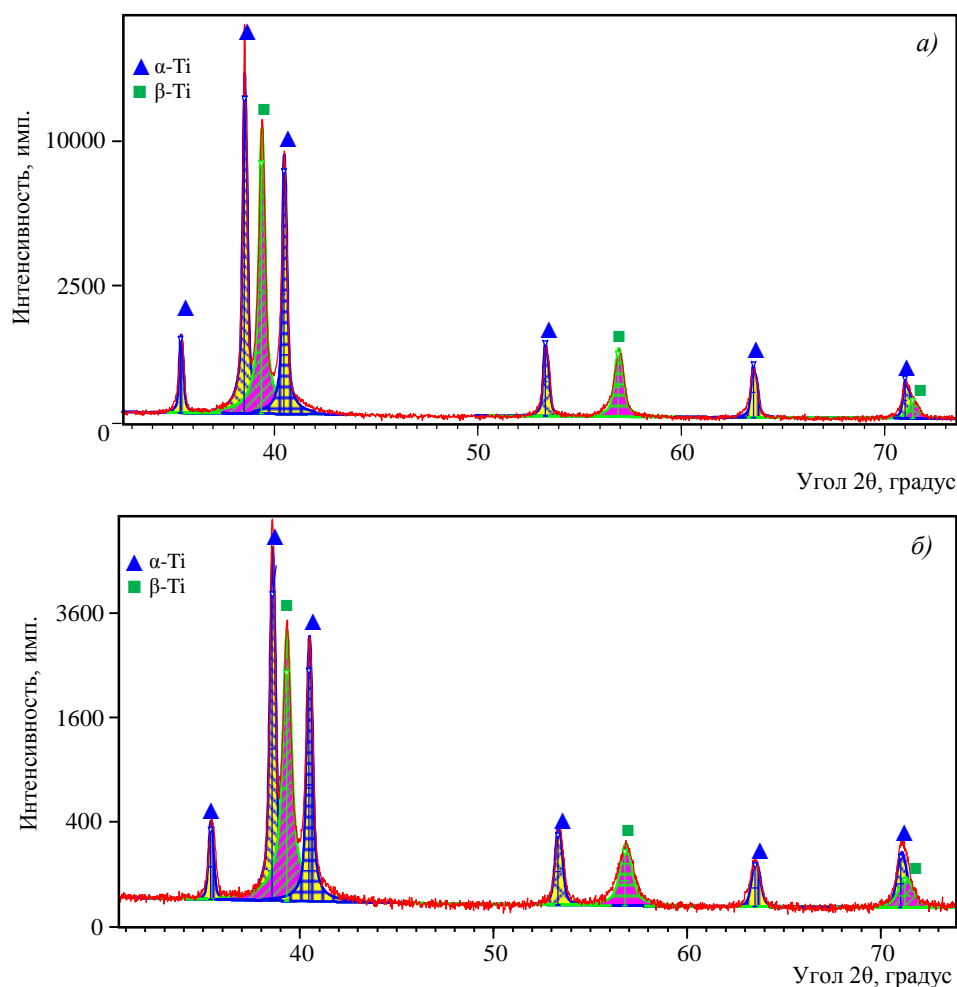


Рис. 2. Дифрактограммы образца из сплава типа VT14 до (а) и после (б) термической обработки

**Периоды (a , c) и микродеформация (ε) решеток фаз α -Ti и β -Ti
в образце из сплава типа VT14 до и после термической обработки**

Состояние образца	α -Ti				β -Ti		Доля β -Ti, %
	a , нм	c , нм	c/a	ε , %	a , нм	ε , %	
До термической обработки	0,29277	0,46666	1,5949	0,209	0,32402	0,344	11,4
После термической обработки	0,29257	0,46694	1,5954	0,094	0,32342	0,203	11,6

Примечание. c/a – степень тетрагональности.

В результате исследования существенного изменения доли фаз не зафиксировано. При отжиге уменьшается плотность дислокации, что приводит к уменьшению величины микродеформации решетки как в α -, так и в β -фазе. При отжиге изменяются периоды решеток α - и β -фазы, что связано с перераспределением легирующих элементов между фазами. Уменьшение периода решетки β -фазы связано с увеличением доли β -стабилизаторов, таких как Mo и V.

Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы:

– в наибольшей степени подвергнуты насыщению водородом электрохимическим способом образцы из сплавов типа VT14 и VT22 за счет высокого содержания β -фазы. Образцы из α -сплава типа VT5 наводороживаются незначительно и непригодны для создания комплектов стандартных образцов с различным содержанием водорода;

– благодаря электрохимическому способу и управлению им с помощью изменения параметров тока можно наводороживать образцы из титановых сплавов типа VT14 и VT22 в широком диапазоне концентраций водорода (0,0023–0,2400 % (по массе)). Из данных типов сплавов можно изготовить стандартные образцы как с низким содержанием в пределах, указанных в нормативной документации [15], так и с высокой концентрацией водорода (0,1300–0,2400 % (по массе)) для аттестации образцов в сфере водородной энергетики;

– при содержании β -фазы 11,4 % и более в исходных образцах из сплава типа VT14 можно не проводить выравнивающий отжиг при температуре 830 °C в течение 3 ч, так как он не оказывает значительного влияния на увеличение доли β -фазы и распределение водорода в образце.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
2. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002 / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
3. Краснов И.С., Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок из титановых сплавов для вероятностного расчета риска разрушения дисков газотурбинных двигателей в эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
4. Дуюнова В.А., Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В. Долговечность поковок и штамповок из сплава VT6 для деталей газотурбинных двигателей и авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.

5. Оглодков М.С., Кашапов О.С., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Сравнительный анализ характеристик отечественных сплавов марок ВТ8, ВТ8М, ВТ8М-1, ВТ9 и сплава Тi6242S (США) применительно к лопаткам компрессора высокого давления авиационных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 3 (76). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-35-50.
6. Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Путырский С.В., Кочетков А.С., Зуева О.В. Современные технологии выплавки слитков титановых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
7. Панин П.В., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Алексеев Е.Б., Ширяев А.А., Новак А.В. Практическое руководство по металлографии сплавов на основе титана и его интерметаллидов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. 200 с.
8. Матюгина И.В., Шубина С.Б. Стандартные образцы для определения газов в металлах // *Методические вопросы выпуска стандартных образцов*. Свердловск: Изд-во ВНИИСО, 1973. С. 114–122.
9. Wu T.-I., Wu J.-K. Effects of cathodic charging and subsequent solution treating parameters on the hydrogen redistribution and surface hardening of Ti–6Al–4V alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. Vol. 466. P. 153–159.
10. Huang Ch.-L., Gao Y.-J., Chuang T.-L. et al. Study of the behavior of titanium alloys as the cathode for photovoltaic hydrogen production // *International Journal of Photoenergy*. 2013. Vol. 3. Art. 857491.
11. Пивоварова Л.Н., Захарова Л.В., Фадеев А.В. Химическая обработка поверхности титановых сплавов // *Современные титановые сплавы и проблемы их развития*. М.: ВИАМ, 2010. С. 75–80.
12. Барашева Т.В., Безгина В.И., Гуськова Е.И., Ермолова М.И., Лашко Н.Ф. Исследование наводороживания титановых сплавов при травлении // *Технология легких сплавов*. 1974. № 6. С. 43–48.
13. Усова В.В., Плотникова Т.П., Кушакевич С.А. Травление титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1984. 128 с.
14. Матюгина И.В., Плинер Ю.Л., Шихалеева Т.В., Усов В.Н. Насыщение водородом стандартных образцов для спектрального анализа сплава ВТ14 // *Труды ВНИИСО*. 1970. Вып. VI. С. 62–66.
15. ОСТ 1 90013–81. Сплавы титановые. Марки. М.: Изд-во стандартов, 1981. С. 1–5.
16. Матюгина И.В., Плинер Ю.Л., Усов В.Н. Стандартные образцы для спектрального определения водорода в титановых сплавах // *Журнал прикладной спектроскопии*. 1972. Т. XVII. Вып. 1. С. 13–16.
17. Каганович Н.Н., Шихалеева Т.В. Наводороживание титановых сплавов при травлении // *Металловедение и термическая обработка*. 1963. № 3. С. 39–44.

References

1. Kablov E.N. Main directions of development of materials for aerospace engineering of the 21st century. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
2. Kablov E.N. Aviation materials science in the 21st century. Prospects and tasks. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: MISiS–VIAM, 2002, pp. 23–47.
3. Krasnov I.S., Lozhkova D.S., Dalin M.A. Evaluation of deficiency of titanium alloy forgings for probabilistic calculation of gas turbine engine disks fracture risk. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 12. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: December 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
4. Duyunova V.A., Pavlova T.V., Kashapov O.S., Chuchman O.V. Fatigue strength of forgings from VT6 alloy for parts of gas turbine engines and aircrafts. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.

5. Oglodkov M.S., Kashapov O.S., Kalashnikov V.S., Kondratieva A.R. Comparative analysis of the characteristics of domestic alloys VT8, VT8M, VT8M-1, VT9 and Ti6242S alloy (USA) as applied to high-pressure compressor blades of aircraft gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-35-50.
6. Duyunova V.A., Oglodkov M.S., Putyrskiy S.V., Kochetkov A.S., Zueva O.V. Modern technologies for melting titanium alloy ingots (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
7. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryaev A.A., Novak A.V. *Practical guide to metallography of titanium-based alloys and its intermetallic compounds*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
8. Matyugina I.V., Shubina S.B. Certified reference materials for determining gases in metals. *Methodological issues of producing certified reference materials*. Sverdlovsk: VNIISO Publ. House, 1973, pp.114–122.
9. Wu T.-I., Wu J.-K. Effects of cathodic charging and subsequent solution treating parameters on the hydrogen redistribution and surface hardening of Ti–6Al–4V alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, vol. 466, pp. 153–159.
10. Huang Ch.-L., Gao Y.-J., Chuang T.-L. et al. Study of the behavior of titanium alloys as the cathode for photovoltaic hydrogen production. *International Journal of Photoenergy*, 2013, vol. 3, art. 857491.
11. Pivovarova L.N., Zakharova L.V., Fadeev A.V. Chemical treatment of titanium alloy surfaces. *Modern titanium alloys and problems of their development*. Moscow: VIAM, 2010, pp. 75–80.
12. Barasheva T.V., Bezgina V.I., Guskova E.I., Ermolova M.I., Lashko N.F. Study of hydrogenation of titanium alloys during etching. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1974, no. 6, pp. 43–48.
13. Usova V.V., Plotnikova T.P., Kushakevich S.A. *Etching of titanium and its alloys*. Moscow: Metallurgy, 1984, 128 p.
14. Matyugina I.V., Pliner Yu.L., Shikhaleeva T.V., Usov V.N. Saturation of standard samples for spectral analysis of VT14 alloy with hydrogen. *Trudy VNIISO*, 1970, is. VI, pp. 62–66.
15. Industry Standard 1 90013–81. *Titanium alloys. Brands*. Moscow: Publ. house of standards, 1981, pp. 1–5.
16. Matyugina I.V., Pliner Yu.L., Usov V.N. Standard samples for spectral determination of hydrogen in titanium alloys. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii*, 1972, vol. XVII, is. 1, pp. 13–16.
17. Kaganovich N.N., Shikhaleeva T.V. Hydrogenation of titanium alloys during etching. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka*, 1963, no. 3, pp. 39–44.

Информация об авторах

Швецова Анастасия Николаевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ерошкин Сергей Геннадьевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anastasia N. Shvetsova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey G. Eroshkin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 12.02.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.02.2025.
The article was submitted 12.02.2025; approved and accepted for publication after reviewing 20.02.2025.