

Научная статья

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-26-34

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАСЫЩЕНИЯ ВОДОРОДОМ ОБРАЗЦОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ТИПА VT14

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. Широкое применение деталей из титановых сплавов в авиационной промышленности и необходимость обеспечения высокого качества их изготовления привели к необходимости разработки новых стандартных образцов для определения и контроля содержания водорода в титановых сплавах. В работе исследованы процессы наводороживания образцов из титанового сплава типа VT14 методом травления в солянокислом растворе в присутствии ионов фтора и методом электрохимического травления. Изготовлен материал заготовок стандартных образцов предприятия с различным содержанием водорода. Измерения содержания водорода в титановых сплавах проведены с применением метода эмиссионного спектрального анализа с искровым возбуждением спектра.

Ключевые слова: определение водорода, спектральный метод анализа, стандартные образцы, водород в титане, химическое и электрохимическое травление

Для цитирования: Швецова А.Н., Ерошкин С.Г. Исследование процесса насыщения водородом образцов титанового сплава типа VT14 // Труды ВИАМ. 2025. № 1 (143). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-26-34.

Scientific article

RESEARCH OF THE PROCESS OF HYDROGEN SATURATION OF SAMPLES OF TITANIUM ALLOY TYPE VT14

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. The wide application of titanium alloy parts in the aviation industry and the need to ensure high quality of their manufacture have led to necessity of the developing of new standard samples for determining and controlling the hydrogen content in titanium alloys. In this work the processes of hydrogenation of titanium alloy samples of the VT14 type by etching in a hydrochloric acid solution in the presence of fluorine ions and by electrochemical etching were studied. The material of standard sample blanks of the enterprise with different hydrogen content was manufactured. The hydrogen content in titanium alloys was measured using the emission spectral analysis method with spark excitation of the spectrum.

Keywords: hydrogen determination, spectral analysis method, standard samples, hydrogen in titanium, chemical and electrochemical etching

For citation: Shvetsova A.N., Eroshkin S.G. Research of the process of hydrogen saturation of samples of titanium alloy type VT14. *Trudy VIAM*, 2025, no. 1 (143), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-26-34.

Введение

В авиационной промышленности контроль содержания водорода в титановых сплавах является важным этапом при производстве и изготовлении деталей из таких сплавов [1–3]. Высокопрочные титановые сплавы применяются в производстве таких ответственных и нагруженных деталей авиационной техники, как промежуточные кольца компрессора, диски [4], рабочие и направляющие лопатки газотурбинных двигателей [5, 6], элементы планера. Высокое содержание водорода может привести к водородному охрупчиванию, появлению различных дефектов материала [7] и, как следствие, к ухудшению эксплуатационных свойств. Контроль содержания водорода обеспечивает стабильность и надежность механических свойств материала, которые оказывают влияние на безопасность и долговечность конечного изделия [8]. Для определения содержания водорода в титановых сплавах применяют следующие методы: эмиссионный спектральный анализ, метод нагрева в токе инертного газа-носителя, метод вакуум-нагрева с масс-спектрометрической регистрацией водорода, масс-спектральный анализ и т. д. Спектральный метод анализа с искровым возбуждением спектра широко используется в лабораториях благодаря своей экономичности и простоте применения. Поэтому в связи с широким применением метода возникла необходимость в выпуске новых стандартных образцов для определения содержания водорода в титане и его сплавах с целью обеспечения контроля качества выпускаемой продукции из титана.

Применение метода эмиссионного спектрального анализа позволяет определять 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 которой через оптоволокно поступает в полихроматор, где разлагается в спектр дифракционной решеткой. Далее спектр регистрируется электронной системой с CCD-детекторами, передается в компьютер и обрабатывается с выдачей результата измерения.

Известно [9], что титановые сплавы склонны к наводороживанию и в зависимости от их фазового состава эта склонность различна. Она возрастает при легировании сплава β -стабилизирующими элементами, т. е. по мере увеличения в структуре количества β -фазы. Процесс травления с выделением водорода идет при химической обработке поверхности титановых сплавов для удаления окисленных слоев в растворах, содержащих серную, соляную, фтористоводородную кислоты и др., т. е. в растворах восстановительного типа. Водород в таких растворах адсорбируется на поверхности и диффундирует в металл тем глубже, чем больше в сплаве содержание β -стабилизирующего элемента. В работе [9] показано, что сплавы с α - и $(\alpha+\beta)$ -структурой, с содержанием β -фазы не более 12–14 % (сплавы типа ВТ1-0, ВТ5, ВТ5-1, ОТ4-1, ВТ20, ВТ6С, ВТ14 в отожженном состоянии и др.) при травлении в восстановительных растворах характеризуются лишь поверхностным наводороживанием на глубину, не превышающую 25–30 мкм. Сплавы с β - и $(\alpha + \beta)$ -структурой, с содержанием β -фазы более 14 % (сплавы типа ВТ14 в закаленном состоянии, ВТ3-1, ВТ16, ВТ22, ВТ23, ВТ15, ВТ30 и др.) при травлении в восстановительных растворах наводороживаются на значительную глубину, которая зависит от продолжительности травления и количества β -фазы в сплаве. В связи с вышеизложенным в качестве исходного материала стандартных образцов выбрали сплав типа ВТ14 с последующей термообработкой, так как он содержит >14 % β -фазы, которая в значительной степени необходима для поглощения водорода и обеспечения его однородности по всей глубине материала.

В нормативной документации [10] верхняя граница допустимого содержания водорода в различных марках титанового сплава находится в диапазоне от 0,003 до 0,015 % (по массе). Выпущенные ранее стандартные образцы (регистрационный № ГСО 1150-77/1153-77) с содержанием водорода 0,0016–0,0181 % (по массе) не доступны для приобретения в РФ, так как их выпуск прекращен. Поэтому разработка и выпуск стандартных образцов титановых сплавов для определения содержания водорода в вышеуказанных концентрациях являются актуальными.

Данная статья посвящена исследованию процесса насыщения водородом титанового сплава типа ВТ14 с применением метода травления в солянокислом растворе в присутствии ионов фтора и метода электрохимического травления. Цель работы – выбор метода и основных технологических параметров наводороживания для получения материала стандартных образцов состава с наиболее однородным распределением водорода.

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

Материалы и методы

В работах [11, 12] изучено влияние температуры отжига и закалки образцов из сплава ВТ14 на наводороживание при травлении в растворе 1,7 н. HCl + 40 г/л NaF при температуре 50 °С. Исследования показали, что термообработанные при температуре <700 °С образцы из сплава ВТ14 наводороживаются незначительно, а термообработанные при более высокой температуре – интенсивно поглощают водород в процессе травления. Это объясняется тем, что в отожженных образцах β-фаза частично сохраняется, что приводит к большему наводороживанию по сравнению с нетермообработанными образцами.

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. В связи с вышеизложенным перед наводороживанием произведен выравнивающий отжиг при температуре 830 °С в течение 3 ч с охлаждением на воздухе для получения равномерного зерна и сохранения β-фазы [13].

Насыщению водородом подвергали шесть образцов из сплава типа ВТ14 длиной 120 мм и диаметром 12 мм. Все образцы отобраны из одной плавки, химический состав исследуемых образцов следующий, % (по массе):

Al	Mo	V	Fe	Si	Zr
5,50	4,34	1,65	0,56	0,20	0,08

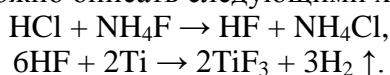
Использовали два метода насыщения: травление в солянокислом растворе в присутствии ионов фтора [14, 15] и электрохимическое травление [16].

Травление образцов с использованием солянокислого раствора в присутствии ионов фтора проводили в стаканах емкостью 800 мл с погружением в раствор. Нагревание раствора осуществляли на электрической плитке. Для травления образцов применяли следующие реактивы: соляную кислоту (х. ч.) с плотностью 1,18 г/см³ и фтористый аммоний (чистый).

Выбраны следующие условия насыщения сплава типа ВТ14 водородом:

- концентрация соляной кислоты 300 мл/л;
- концентрация фтористого аммония 20 г/л;
- вода дистиллированная по ГОСТ Р 58144–2018;
- температура раствора 70 °С.

По данным работы [17], взаимодействие титана с соляной кислотой в присутствии фтористого аммония можно описать следующими химическими реакциям:



Для установления влияния состояния поверхности образца после отжига на процесс наводороживания часть образцов подвергали механической обработке, а именно – обточке торцов и образующей поверхности образцов на токарном и шлифовальном станках для удаления окалины, а часть оставляли в исходном состоянии без механической обработки с шероховатой поверхностью. Таким образом, травлению в течение 30 мин подвергали два образца (после механической обработки с гладкой отшлифованной поверхностью и без механической обработки с шероховатой поверхностью и не удаленной окалиной), травлению в течение 90 мин – один гладкий образец после механической обработки.

В процессе наводороживания происходило интенсивное выделение газа – максимальное в начале процесса, т. е. пока раствор свежий. Одним из недостатков данного метода является то, что в процессе травления интенсивность выделения газа в растворе снижается, что может приводить в дальнейшем к значительным отклонениям получаемого значения содержания водорода в образце от расчетного. По окончании процесса наводороживания поверхность гладких образцов после механической обработки снова стала шероховатой, наблюдались уменьшение диаметра и изменение массы образца, подвергнутого травлению в течение 90 мин. Масса образца до травления в течение 90 мин составляла 45 г, после: 33 г.

Электрохимическое травление образцов титанового сплава проводили под действием электрического тока в смеси кислот для травления, в результате происходило выделение водорода на катоде, которым являлся титановый образец.

В отличие от химического способа, данный способ существенно более управляемый, так как можно регулировать температуру, плотность тока и продолжительность процесса.

В качестве электролита использовали раствор следующего состава:

- концентрация натрия серноокислого (х. ч.) 20 г/л;
- концентрация серной кислоты (х. ч., плотность 1,83 г/см³) 5 мл/л;
- концентрация ортофосфорной кислоты (х. ч., плотность 1,71 г/см³) 5 мл/л;
- вода дистиллированная по ГОСТ Р 58144–2018;
- температура обработки 25 °С;
- напряжение постоянного тока 8 В.

Продолжительность травления варьировали от 30 до 90 мин, катод – наводороживаемый образец, анод изготовлен из инертного материала (графит).

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

- концентрация азотной кислоты (х. ч., плотность 1,4 г/см³) 200 мл/л;
- концентрация фтористоводородной кислоты (х. ч., плотность 1,123 г/см³) 20 мл/л;
- вода дистиллированная по ГОСТ Р 58144–2018;
- температура раствора 25 °С;
- продолжительность травления 5 мин.

С целью установления влияния состояния поверхности и продолжительности обработки на содержание водорода, как и в первом случае, наводороживанию в течение 30 мин подвергали два образца (после механической обработки с гладкой отшлифованной поверхностью и без механической обработки с шероховатой поверхностью и не удаленной окалиной), наводороживанию в течение 90 мин – один гладкий образец после механической обработки. Продолжительность обработки (30 и 90 мин) выбрана с целью сравнения результатов наводороживания химическим и электрохимическим способами.

В процессе наводороживания происходило интенсивное выделение газа, которое было одинаковым на протяжении всего эксперимента. По окончании процесса поверхность образцов осталась прежней – шероховатость, размеры и масса образцов не изменились.

Для обеспечения равномерности распределения водорода по всему объему образцы после насыщения подвергали дополнительному выравнивающему отжигу в течение 100 ч при температуре 500 °С, а также удаляли поверхностный слой толщиной 1 мм.

Водород в образцах определяли спектральным методом с помощью эмиссионного спектрометра «Титан СЛ», настроенного на регистрацию линии водорода 656,279 нм.

Результаты и обсуждение

Получены данные по содержанию водорода в образцах до и после проведения отжига.

Результаты анализа образцов из сплава типа ВТ14 на содержание водорода до проведения отжига:

Условный номер образца	1	2	3	4	5	6
Содержание водорода, % (по массе)	0,0024	0,0032	0,0030	0,0030	0,0031	0,0031

Результаты анализа образцов типа ВТ14 на содержание водорода после проведения отжига при температуре 830 °С в течение 3 ч:

Условный номер образца	1	2	3	4	5	6
Содержание водорода, % (по массе)	0,0032	0,0034	0,0032	0,0037	0,0039	0,0033

Из представленных данных следует, что начальное содержание водорода находится в диапазоне от 0,0024 до 0,0031 % (по массе) и незначительно увеличивается после проведения отжига. Наблюдаемое увеличение содержания водорода может быть связано с диффузией водорода в образец из окружающей среды, так как отжиг производили без вакуума и с охлаждением на воздухе.

После проведения процесса насыщения образцов водородом наблюдается значительное увеличение его концентрации – особенно при использовании метода травления в солянокислом растворе (табл. 1). Наблюдается также зависимость концентрации водорода от продолжительности процесса травления. Образцы, прошедшие механическую обработку на токарном и шлифовальном станках, обозначены как образцы с гладкой поверхностью в табл. 1–4, образцы без механической обработки и с неудаленной окалиной обозначены как образцы с шероховатой поверхностью.

Таблица 1

Результаты анализа образцов из сплава типа ВТ14 на содержание водорода после насыщения методом травления в солянокислом растворе в присутствии ионов фтора (химическое травление) и методом электрохимического травления

Показатель	Значение показателя для образцов после травления					
	химического			электрохимического		
	1	2	3	4	5	6
Поверхность образца	Гладкая		Шероховатая	Гладкая	Шероховатая	Гладкая
Продолжительность травления, мин	90	30	30	30	30	90
Содержание водорода, % (по массе)	0,1351	0,1115	0,1127	0,0074	0,0059	0,0173

Таблица 2

**Результаты анализа образцов из сплава типа ВТ14 на содержание водорода
после наводороживания и последующего гомогенизирующего отжига
при температуре 500 °С в течение 100 ч**

Показатель	Значение показателя для образцов после травления					
	химического			электрохимического		
	1	2	3	4	5	6
Поверхность образца	Гладкая		Шероховатая	Гладкая	Шероховатая	Гладкая
Продолжительность травления, мин	90	30	30	30	30	90
Содержание водорода, % (по массе)	0,1350	0,0647	0,0804	0,0052	0,0056	0,0097

Таблица 3

**Результаты анализа образцов из сплава типа ВТ14 на содержание водорода
после снятия поверхностного слоя толщиной 1 мм**

Показатель	Значение показателя для образцов после травления					
	химического			электрохимического		
	1	2	3	4	5	6
Поверхность образца	Гладкая		Шероховатая	Гладкая	Шероховатая	Гладкая
Продолжительность травления, мин	90	30	30	30	30	90
Содержание водорода, % (по массе)	0,1192	0,0584	0,0702	0,0043	0,0041	0,0090

Таблица 4

**Результаты определения содержания водорода на концах и в середине
исследуемых образцов**

Показатель	Значение показателя для образцов после травления					
	химического			электрохимического		
	1	2	3	4	5	6
Поверхность образца	Гладкая		Шероховатая	Гладкая	Шероховатая	Гладкая
Продолжительность травления, мин	90	30	30	30	30	90
Содержание водорода, % (по массе):						
в середине образца	0,1303	0,0751	0,0798	0,0075	0,0076	0,0095
в левом конце образца	0,1404	0,0799	0,0792	0,0062	0,0071	0,0094
в правом конце образца	0,1350	0,0728	0,0781	0,0082	0,0078	0,0081
Разность наибольшего и наименьшего значений, % (по массе)	0,0101	0,0071	0,0017	0,002	0,0007	0,0014
Относительная разность наибольшего и наименьшего значений, % (отн.)	7,47	9,35	2,15	27,40	9,33	15,56

Результаты измерения содержания водорода после гомогенизирующего отжига в течение 100 ч при температуре 500 °С представлены в табл. 2, после удаления поверхностного слоя толщиной 1 мм – в табл. 3.

Видно, что концентрация водорода в поверхностном слое может незначительно отличаться от концентрации в объеме всего материала. Это может быть связано с тем, что даже при обычном вылеживании образцов на воздухе водород постепенно распределяется в результате проникновения вглубь металла, а при выдерживании образцов

в течение 100 ч при повышенной температуре водород равномерно распределяется не только по центральной части образца, но и в поверхностном слое, что объясняет незначительный перепад концентраций.

Для исследования неоднородности в объеме одного образца определяли значения содержания водорода на концах и в середине образца – результаты анализа представлены в табл. 4. Относительная разность максимального и минимального значения содержания водорода в образцах находится в диапазоне 2,15–27,40 % (отн.).

Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы:

– методом химического травления образцы наводороживаются наиболее сильно, но он является менее управляемым в отличие от электрохимического способа и подходит только для создания стандартных образцов с большим содержанием водорода;

– в процессе химического травления в течение 90 мин масса исходного образца уменьшается на ~26,6 % в связи с его растворением в кислоте, в то время как при электрохимическом способе этого не происходит;

– благодаря электрохимическому способу и управлению им с помощью изменения параметров тока, можно наводороживать стандартные образцы титановых сплавов в диапазоне содержания водорода 0,003–0,015 % (по массе). Данный диапазон концентраций соответствует содержанию водорода в большинстве разработанных титановых сплавах;

– степень наводороживания титановых сплавов при использовании методов химического и электрохимического травления зависит от продолжительности травления: чем больше продолжительность, тем сильнее образец насыщается водородом;

– наличие окалины и шероховатости поверхности образцов не оказывает значительного влияния на процесс поглощения водорода. Содержание водорода после травления в образцах, подвергавшихся механической обработке на токарном и шлифовальном станках, сопоставимо с концентрациями в образцах, не подвергавшихся обработке, и отличается незначительно;

– изготовленный при выполнении работ материал может применяться для производства стандартных образцов для определения содержания водорода в титановых сплавах.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. научно-информационных материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
2. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля /под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд., с изм. и доп. М.: ВИАМ, 2019. 316 с.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. 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: 12.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
5. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.

6. Дуюнова В.А., Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В. Долговечность поковок и штамповок из сплава ВТ6 для деталей газотурбинных двигателей и авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 02. URL: <http://journal.viam.ru>. (дата обращения: 12.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
7. Колачев Б.А. Водородная хрупкость в цветных металлах. М.: Металлургия, 1966. 253 с.
8. 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: 12.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
9. 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.
10. ОСТ 1 90013-81. Сплавы титановые. Марки. М.: Изд-во стандартов, 1981. С. 1–5.
11. Каганович Н.Н., Шихалеева Т.В. Наводороживание титановых сплавов при травлении // *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1963. № 3. С. 39–44.
12. Каганович Н.Н. Титановые сплавы для новой техники. М.: Наука. 1968. С. 230–243.
13. Ливанов В.А., Буханов А.А., Колачев Б.А. Водород в титане. М.: ГНТИ, 1962. 246 с.
14. 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.
15. 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.
16. Резниченко В.А. Титан и его сплавы. Металлотермия и электрохимия титана. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 266 с.
17. Straumanis M.E., Chem P.C. The Mechanism and Rate of Dissolution of Titanium in Hydrofluoric Acid // *Journal of Electrochemical Society*. 1951. Vol. 98. No. 6. P. 63.

References

1. Kablov E.N. *Trends and guidelines for innovative development of Russia: collection of scientific and information materials*. 3rd ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
2. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Intermetallic alloys based on titanium and nickel*. Ed. E.N. Kablov. 2nd ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2019, 316 p.
3. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. 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: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
5. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
6. 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: April 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
7. Kolachev B.A. *Hydrogen embrittlement in non-ferrous metals*. Moscow: Metallurgiya, 1966, 253 p.
8. 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: April 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.

9. 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.
10. Industry Standard 1 90013–81. *Titanium alloys. Brands*. Moscow: Publ. house of standards, 1981, pp. 1–5.
11. Kaganovich N.N., Shikhaleeva T.V. Hydrogenation of titanium alloys during etching. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1963, no. 3, pp. 39–44.
12. Kaganovich N.N. *Titanium alloys for new technology*. Moscow: Nauka, 1968, pp. 230–243.
13. Livanov V.A., Bukhanov A.A., Kolachev B.A. *Hydrogen in titanium*. Moscow: GNTI, 1962, 246 p.
14. Matyugina I.V., Pliner Yu.L., Usov V.N. Certified samples for spectral determination of hydrogen in titanium alloys. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii*, 1972, vol. XVII, is. 1, pp. 13–16.
15. Matyugina I.V., Pliner Yu.L., Shikhaleeva T.V., Usov V.N. Saturation of certified samples for spectral analysis of VT14 alloy with hydrogen. *Trudy VNIISO*, 1970, is. VI, pp. 62–66.
16. Reznichenko V.A. *Titanium and its alloys. Metallothermy and electrochemistry of titanium*. Moscow: Publ. House of the USSR Academy of Sciences, 1961, 266 p.
17. Straumanis M.E., Chem P.C. The Mechanism and Rate of Dissolution of Titanium in Hydrofluoric Acid. *Journal of Electrochemical Society*, 1951, vol. 98, no. 6, p. 63.

Информация об авторах

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

Ерошкин Сергей Геннадьевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, 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 30.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.09.2024.
The article was submitted 30.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 11.09.2024.