Научная статья

УДК 543.42:546.11
DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-65-73

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ НАВОДОРОЖИВАНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ТИПА ВТ14 ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА

А.Н. Швецова[1]

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

Аннотация. *Широкое применение титановых сплавов в авиационной сфере требует разработки стандартных образцов, необходимых для точного определения и контроля уровня содержания водорода в данных материалах. Исследовано влияние факторов наводороживания, таких как продолжительность выдержки, состав электролита и концентрации в нем действующих солей и кислот, напряжение постоянного тока, на процесс насыщения водородом титанового сплава типа ВТ14. Проанализированы содержание и распределение водорода в образцах, полученных при различных условиях наводороживания.*

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

Для цитирования: Швецова А.Н. Исследование факторов наводороживания титанового сплава типа ВТ14 для изготовления стандартных образцов содержания водорода // Труды ВИАМ. 2026. № 6 (160). С. 65–73. URL: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-65-73.

Scientific article

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

A.N. Shvetsova[1]

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

Abstract. *The widespread use of titanium alloys in the aviation sector requires the development of standard samples necessary for precise determination and control of hydrogen content levels in these materials. The study investigates the influence of hydrogenation factors such as holding time, electrolyte composition, and the concentration of active salts and acids in it, as well as direct current voltage on the process of hydrogen saturation of the VT14 type titanium alloy. An analysis has been conducted of hydrogen content and distribution in samples obtained under various hydrogenation conditions.*

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

For citation: Shvetsova A.N. Research of the process of hydrogen saturation of standard samples of titanium alloy type VT14. *Trudy VIAM*, 2026, no. 6 (160), pp. 65–73. Available at: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-65-73.

Введение

Благодаря преимуществам перед другими конструкционными материалами, в частности благоприятному сочетанию малой массы и высокой коррозионной стойкости, титановые сплавы получили широкое распространение в авиа- и ракетостроении [1–7]. Однако избыточное содержание водорода в них может спровоцировать охрупчивание и образование дефектов [8], что негативно отражается на эксплуатационных параметрах изделий.

Одним из наиболее эффективных методов контроля газов в металле является спектральный анализ, реализация которого возможна только при наличии стандартных образцов, имеющих весь спектр концентраций водорода, необходимый для аналитического контроля процессов обработки титановых сплавов. Комплекты стандартных образцов можно получить путем наводороживания металла методами химического [9, 10] или электрохимического травления. В работах [11, 12] рассмотрены преимущества метода электрохимического травления перед химическим способом. Однако факторы наводороживания, влияющие на процесс насыщения титановых сплавов типа ВТ14 при электрохимическом травлении и распределение водорода по объему образцов, подробно не исследованы.

Уровень насыщения металла водородом при электрохимическом травлении определяют следующие факторы:

– продолжительность наводороживания;
– плотность тока;
– концентрация кислоты в электролите;
– концентрация соли/добавок в электролите;
– температура электролита.

В работе [13] изучена кинетика электрохимического наводороживания титана при различной плотности катодного тока. Эксперименты выполняли на образцах из титановой фольги марки ВТ1-0 толщиной 0,15 мм, подвергая их наводороживанию в течение 8 ч. Наиболее активное наводороживание металла происходило при плотности катодного тока 5–50 мА/см^2. В диапазоне 50–500 мА/см^2 отмечено снижение скорости процесса насыщения. При плотности тока >500 мА/см^2 изменение содержания водорода было минимальным.

Зависимость степени травления сплава марки ВТ1-0 от состава травителя исследована в статье [14]. Авторы варьировали концентрации фторида аммония (NH_4F) и минеральных кислот (H_3PO_4, HCl, H_2SO_4). Установлено, что в исследуемых растворах степень травления возрастает с увеличением концентрации кислоты. При этом скорость травления титана в соляной и серной кислотах на порядок больше, чем в фосфорной. Зависимость степени травления от концентрации фторида аммония имела не столь тривиальный характер. Так, с увеличением концентрации NH_4F до 0,2 моль/л степень травления возрастала, а затем уменьшалась.

В исследовании [15] изучено влияние неорганических добавок на степень насыщения водородом титанового сплава типа ВТ6. В качестве электролита использовали 1 н раствор серной кислоты. Экспериментальные условия предусматривали два уровня плотности катодного тока (1 и 20 мА/см^2), а продолжительность обработки варьировали в пределах от 0,75 до 120 ч. Полученные данные свидетельствуют о том, что среди всех протестированных добавок наиболее сильное действие на процесс водородного насыщения оказывают соединения, содержащие серу.

Температура электролита – существенный фактор, определяющий количество поглощенного металлом водорода при катодном насыщении [16]. Чтобы оценить влияние температуры, авторы исследования [13] провели серию экспериментов при 20, 30,

40, 50 и 60 °С. Полученные результаты показали возрастание концентрации водорода в образцах из титановой фольги ВТ1-0 по мере повышения температуры с 20 до 50 °С. Концентрация водорода возросла с 0,38 % (по массе) при 20 °С до 0,72 % (по массе) при 50 °С, что соответствует увеличению показателя в ~2 раза. При дальнейшем повышении температуры до 60 °С существенного изменения концентрации водорода не наблюдали. Вероятно, это связано с трансформацией свойств тиокарбамида – стимулирующей добавки в электролите, которая при повышенных температурах способна разлагаться.

Степень насыщения водородом можно контролировать путем подбора оптимальных факторов наводороживания, таких как продолжительность и температура выдержки, состав электролита и концентрации в нем действующих солей и кислот, плотность тока. Цель данной работы – исследование влияния перечисленных параметров на процесс наводороживания и распределение водорода в образцах, полученных при различных условиях наводороживания.

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

Материалы и методы

Важным фактором, влияющим на процесс насыщения титановых сплавов водородом, является размер зерна металла: меньшие зерна обеспечивают более высокое насыщение водородом [17]. При неоднородной структуре зерен возможно неравномерное распределение водорода как в пределах одного образца, так и между образцами после процесса насыщения. Для получения металла с однородным зерном и равномерным фазовым составом перед процедурой насыщения образцы подвергали гомогенизирующему отжигу при температуре 830 °С в течение 3 ч с охлаждением на воздухе.

В качестве исходного материала стандартного образца выбран сплав типа ВТ14, образцы представляли собой цилиндры диаметром 12 мм и длиной 120 мм. Титановый сплав типа ВТ14 имеет следующий химический состав, % (по массе):

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

Для насыщения образцов водородом использован метод электрохимического насыщения, так как во время травления не происходит потери массы образца в связи с его растворением в кислоте, как при химическом травлении [11, 12]. Благодаря варьированию факторов наводороживания также можно более точно задавать необходимую концентрацию водорода в металле.

Процесс электрохимического травления титановых сплавов осуществляли путем подвода электрического тока к раствору электролита, в результате чего на поверхности титанового образца (выполняющего функции катода) происходило активное выделение водорода. Использовали электролит следующего состава (на 1 л):

Na_2SO_4 (х. ч.)	H_2SO_4 плотностью 1,83 г/см^3 (х. ч.)	H_3PO_4 плотностью 1,71 г/см^3 (х. ч.)
20 г	5 мл	5 мл

Температура электрохимического наводороживания составила 25 °С, продолжительность травления – от 15 до 180 мин, напряжение постоянного тока – от 3 до 15 В.

Электрохимическая ячейка собрана по следующей схеме: катод – образец, подвергаемый наводороживанию; анод – пластина из инертного материала (графит).

Влияние концентрации (от 5 до 60 мл/л) серной кислоты в электролите изучали при неизменном содержании ортофосфорной кислоты и натрия сернокислого. Для исследования влияния натрия сернокислого его содержание варьировали от 10 до 60 мл/л, сохраняя постоянные концентрации H_2SO_4 и H_3PO_4.

Перед загрузкой в ячейку образцы проходили подготовительную стадию – травление в специальном растворе при температуре 25 °С в течение 5 мин. Раствор для предварительного декапирования образцов имеет следующий состав, мл/л:

HNO_3 плотностью 1,4 г/см^3 (х. ч.)	HF плотностью 1,123 г/см^3 (х. ч.)
200	20

При насыщении образцов водородом наблюдали активное газовыделение, при этом его интенсивность оставалась стабильной на всех этапах эксперимента.

Для равномерного распределения водорода травленые образцы подвергали стабилизирующему отжигу в печи при температуре 500 °С в течение 100 ч.

Концентрацию водорода в образцах определяли на эмиссионном спектрометре Титан СЛ, в основу работы которого положен метод эмиссионного спектрального анализа, учитывающий зависимость интенсивности спектральных линий от содержания элемента в пробе. Данный метод обеспечивает определение водорода в титановых сплавах с пределом обнаружения от 0,0010 % (по массе). Суть метода заключается в измерении интенсивности излучения линии водорода в спектре, возбужденной генератором одиночной искры. Полученное излучение через оптическое волокно направляется в полихроматор, где происходит его спектральное разложение с помощью дифракционной решетки. Разложенный спектр регистрируется с помощью фотоприемников, после чего результаты передаются в компьютер для анализа и получения окончательных данных.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты изучения влияния продолжительности наводороживания на степень насыщения водородом.

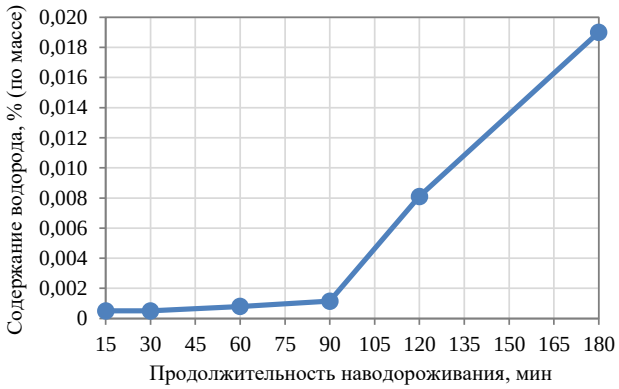


Рис. 1. Влияние продолжительности наводороживания на степень насыщения водородом (температура обработки 25 °С, напряжение постоянного тока 8 В, состав электролита (на 1 л): 5 мл H_2SO_4, 20 г Na_2SO_4, 5 мл H_3PO_4)

Скорость поглощения водорода на начальной стадии небольшая, но при достижении продолжительности выдержки >90 мин многократно возрастает. Возможно, меньшая скорость насыщения водородом на начальной стадии связана с поверхностными барьерами, например с очень тонким слоем оксидов, замедляющим процесс абсорбции.

К параметрам, влияющим на эффективность электрохимического травления и степень насыщения водородом, также следует отнести концентрации солей и кислот в растворе. На рис. 2 и 3 представлены графики зависимостей содержания водорода в образце от концентраций натрия сернокислого и серной кислоты.

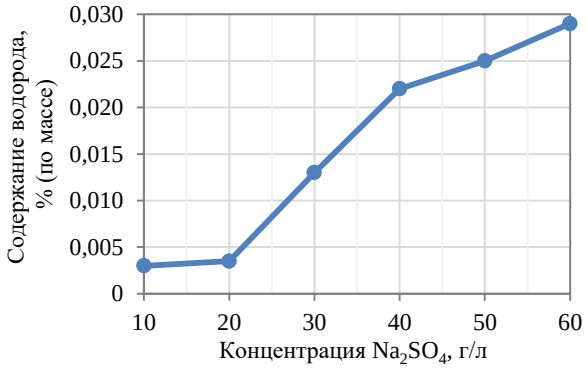


Рис. 2. Влияние концентрации натрия сернокислого на степень насыщения водородом (температура обработки 25 °С, напряжение постоянного тока 8 В, продолжительность выдержки 1 ч, состав электролита, мл/л: 5 – H_2SO_4, 5 – H_3PO_4)

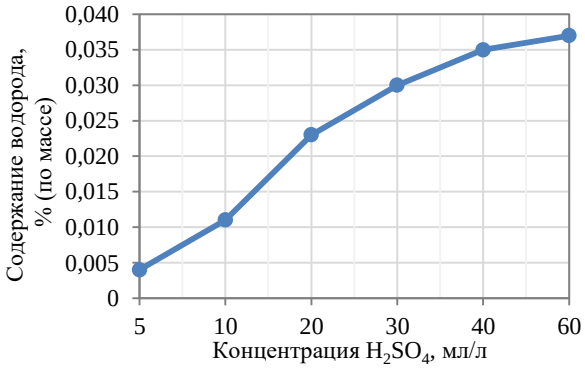


Рис. 3. Влияние концентрации серной кислоты на степень насыщения водородом (температура обработки 25 °С, напряжение постоянного тока 8 В, продолжительность выдержки 1 ч, состав электролита (на 1 л): 20 г Na_2SO_4, 5 мл H_3PO_4)

С увеличением концентраций серной кислоты и натрия сернокислого степень насыщения водородом возрастает. Наибольший эффект на степень насыщения оказывает концентрация серной кислоты.

Величина напряжения постоянного тока также влияет на степень насыщения водородом при электрохимическом наводороживании (рис. 4).

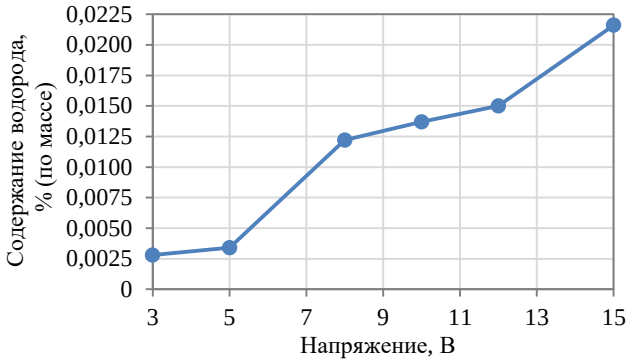


Рис. 4. Влияние напряжения постоянного тока на степень насыщения водородом (температура обработки 25 °С, продолжительность выдержки 1 ч, состав электролита (на 1 л): 5 мл H_2SO_4, 20 г Na_2SO_4, 5 мл H_3PO_4)

Характер полученной зависимости содержания водорода от прилагаемого напряжения объясняется тем, что повышение напряжения постоянного тока, как правило, приводит к увеличению плотности тока. Более высокая плотность тока означает, что на единицу площади поверхности металла выделяется большее количество ионов водорода, что в свою очередь приводит к увеличению содержания абсорбированного водорода.

Для оценки равномерности (по длине и сечению) распределения водорода после наводороживания проведен локальный спектральный анализ на разных участках образца, отобранного случайным образом.

Анализировали край образца, далее от него отрезали участок длиной 5 мм и повторяли анализ, и так далее до отметки 50 мм, которая означает центр прутка (рис. 5). Синим маркером обозначены места реза и проведения локального спектрального анализа.

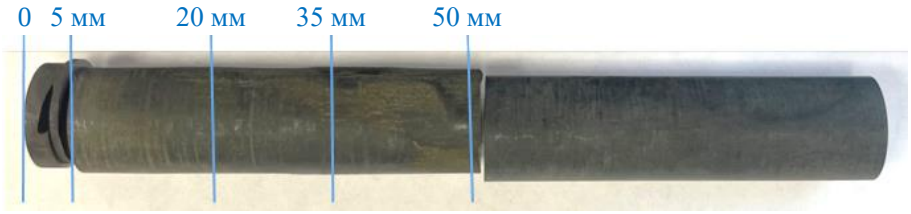


Рис. 5. Образец после наводороживания и последующего выравнивающего отжига

В таблице представлены результаты спектрального анализа на разных участках по длине данного образца.

Распределение содержания водорода по длине образца

Расстояние от края до центра образца, мм	0	5	20	35	50
Содержание водорода, % (по массе)	0,0093	0,0068	0,0070	0,0067	0,0069
Примечание. Условия травления: температура 25 °С, продолжительность 2 ч, напряжение постоянного тока 8 В, состав электролита (на 1 л): 5 мл H_2SO_4, 20 г Na_2SO_4, 5 мл H_3PO_4. Условия термообработки перед наводороживанием: 830 °С, 3 ч; после наводороживания: 500 °С, 100 ч.					

На рис. 6, *а* представлено сечение образца на расстоянии 20 мм от его края. Проведено шесть параллельных измерений по вертикали (номера 1–6) и по горизонтали (номера 7–12). На рис. 6, *б* показаны результаты параллельных измерений в виде гистограммы распределения концентрации водорода в сечении.

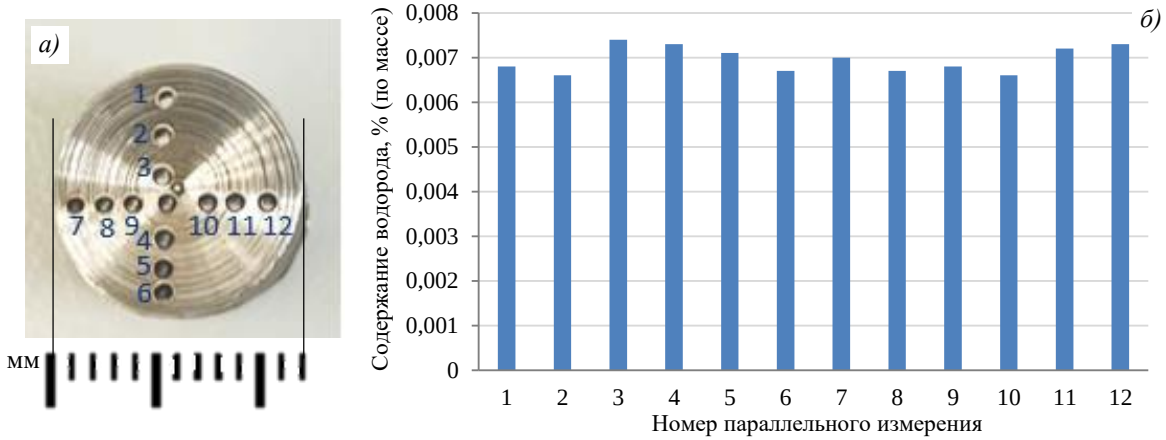


Рис. 6. Сечение на расстоянии 20 мм от края образца (*а*) и гистограмма распределения содержания водорода по данному сечению (*б*)

Если водород поступает из окружающей среды, как это происходит при электрохимическом травлении, его концентрация максимальна на поверхности образца и постепенно уменьшается к центру. Это создает градиент концентрации водорода от поверхности вглубь сечения. Со временем (при постоянной температуре) профиль выравнивается, приближаясь к равномерному распределению, если отсутствуют внутренние ловушки. Этим можно объяснить повышенное содержание водорода на краю образца, а также его равномерное распределение по длине образца начиная уже с расстояния 5 мм

от края и далее до центра прутка. Анализ параллельных измерений, проведенных с отступом ~1 мм от края образца, показывает равномерное распределение водорода по сечению. Относительная разность наибольшего и наименьшего значения по сечению составляет 10,81 %.

Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы.

Путем варьирования параметров электрохимического процесса можно точно контролировать степень наводороживания стандартных образцов титановых сплавов. Получаемый диапазон концентраций водорода (0,003–0,037 % (по массе)) совпадает с характерным уровнем содержания водорода в разработанных титановых сплавах.

Установлено, что, увеличивая величины факторов, влияющих на процесс насыщения водородом, таких как продолжительность наводороживания, напряжение постоянного тока, концентрации серной кислоты и натрия сернокислого, можно насыщать образцы до содержания водорода 0,037 % (по массе). При равных условиях травления наиболее значимым наводороживающим фактором является концентрация серной кислоты. Достаточное наводороживание достигается при продолжительности выдержки >90 мин.

Согласно результатам исследования распределения водорода по сечению и длине образца, полученный материал является однородным. Однако повышенное содержание водорода на краю образца свидетельствует о существовании поверхностного слоя, который рекомендуется удалить (на толщину 1 мм) для получения более однородных образцов.

По итогам выполненных работ получен материал, который можно использовать при производстве стандартных образцов для измерения массовой доли водорода в титановых сплавах.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития Росси: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
2. 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 Ti6242S (США) применительно к лопаткам компрессора высокого давления авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). С. 35–50. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-35-50.
3. 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). С. 30–40. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
4. Каблов Е.Н., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Крохина В.А., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталостному разрушению штамповок из высокопрочного титанового сплава ВТ22М, изготовленных с заключительной деформацией в (α+β)- и β-областях // Титан. 2021. № 1 (70). С. 26–33.
5. 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). С. 115–122. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
6. 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.

7. 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). С. 23–35. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
8. Колачев Б.А. Водородная хрупкость в цветных металлах. М.: Металлургия, 1966. 253 с.
9. 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.
10. 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.
11. Швецова А.Н., Ерошкин С.Г. Исследование процесса насыщения водородом образцов титанового сплава типа ВТ14 // Труды ВИАМ. 2025. № 1 (143). С. 26–34. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-26-34.
12. Швецова А.Н., Ерошкин С.Г. Исследование процесса наводороживания титановых сплавов типа ВТ5, ВТ14, ВТ22 для изготовления стандартных образцов содержания водорода // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150) С. 76–84. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-76-84.
13. Бурнышев И.Н., Калюжный Д.Г. О катодном наводороживании титана // Химическая физика и мезоскопия. 2014. Т. 16. № 2. С. 250–256.
14. Гузеева Т.И., Леонова Л.А., Крикуненко А.С. Модификация поверхности и свойств титана медицинского назначения химическим травлением // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2011. № 1. С. 120–124.
15. Wu T.-I., Wu J.-K. The effects of chemical additives on the hydrogen uptake behavior of Ti–6Al–4V alloy // Materials Chemistry and Physics. 2003. Vol. 80. P. 150–156.
16. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: Высшая школа, 1975. 568 с.
17. Резниченко В.А. Титан и его сплавы. Металлотермия и электрохимия титана. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. 266 с.

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. 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), pp. 35–50. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-35-50.
3. 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), pp. 30–40. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
4. Kablov E.N., Putyrskiy S.V., Yakovlev A.L., Krokhina V.A., Naprienko S.A. Study of fatigue fracture resistance of stampings made of high-strength titanium alloy VT22M, manufactured with final deformation in the (α+β)- and β-regions. *Titan*, 2021, no. 1 (70), pp. 26–33.
5. 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), pp. 115–122. Available at: https://www.journal.viam.ru (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
6. 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.
7. 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), pp. 23–35. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.

8. Kolachev B.A. *Hydrogen embrittlement in non-ferrous metals*. Moscow: Metallurgy, 1966, 253 p.
9. Matyugina I.V., Pliner Yu.L., Usov V.N. Certified reference materials for the spectral determination of hydrogen in titanium alloys. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii*, 1972, vol. XVII, is. 1, pp. 13–16.
10. Matyugina I.V., Pliner Yu.L., Shikhaleeva T.V., Usov V.N. Saturation of certified reference materials for the spectral analysis of VT14 alloy with hydrogen. *Proceedings of VNIISO*, 1970, is. VI, pp. 62–66.
11. Shvetsova A.N., Eroshkin S.G. Research of the process of hydrogen saturation of samples of titanium alloy type VT14. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), pp. 26–34. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-26-34.
12. 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), pp. 76–84. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-76-84.
13. Burnyshev I.N., Kalyuzhny D.G. On cathodic hydrogenation of titanium. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*, 2014, vol. 16, no. 2, pp. 250–256.
14. Guzeeva T.I., Leonova L.A., Krikunenko A.S. Modification of the surface and properties of medical-grade titanium by chemical etching. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya,* 2011, no. 1, pp. 120–124.
15. Wu T.-I., Wu J.-K. The effects of chemical additives on the hydrogen uptake behavior of Ti–6Al–4V alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, vol. 80, pp. 150–156.
16. Antropov L.I. *Theoretical Electrochemistry*. Moscow: Vysshaya Shkola, 1975, 568 p.
17. Reznicenko V.A. *Titanium and Its Alloys. Metallothermy and Electrochemistry of Titanium*. Moscow: Publ. House of the USSR Academy of Sciences, 1961, 266 p.

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

Статья поступила в редакцию 16.01.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.01.2026.
The article was submitted 16.01.2026; approved and accepted for publication after reviewing 23.01.2026.