

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Научная статья

УДК 53.081.7:621.317.7.089.68

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-1-85-92>



К вопросу о построении калибровочной кривой с помощью спектрометра эмиссионного тлеющего разряда для измерений содержания водорода в сплавах циркония

А. А. Спиридонова^{1,2}  , В. Н. Кудияров¹ , Р. С. Лаптев¹ 

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия

 spiridonova@tcsms.tomsk.ru

² Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Томской области, г. Томск, Россия

Аннотация: Одно из магистральных направлений современной деятельности исследователей-метрологов – обеспечение реального сектора экономики Российской Федерации стандартными образцами, аналоги которых в стране отсутствуют. В данной работе рассматриваются вопросы исследования высокоэффективных материалов для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) в активных зонах тепловых реакторов, сфера применения которых достаточно широка. Цель исследования состояла в разработке образцов состава сплава циркония для установления и контроля стабильности калибровочной (градуировочной) характеристики спектрометров при определении массовой доли водорода при условии соответствия метрологических и технических характеристик стандартного образца требованиям методики измерений. Проанализированы основные методы определения содержания водорода в материалах. Установлено, что наиболее широкое применение нашел метод оптической эмиссионной спектроскопии в тлеющем разряде. Также установлено, что в качестве основного материала в большинстве случаев выбирают циркониевые сплавы.

Отмечена необходимость создания образцов для построения калибровочной кривой спектрометров для измерений содержания водорода в циркониевом сплаве. Разработаны образцы из циркониевого сплава Zr-1Nb (марка Э110) для построения калибровочной характеристики с помощью спектрометра эмиссионного тлеющего разряда для измерений с массовой долей водорода от 0,034 до 0,498 %. На примере спектрометра эмиссионного тлеющего разряда типа GD Profiler2 проведена калибровка по разработанным образцам с получением калибровочной кривой. Относительная погрешность полученного при калибровке значения массовой доли водорода не превысила $\pm 10\%$. Практическая значимость исследования заключается в обосновании разработки образцов, которые могут быть применены для проведения калибровки спектрометров, основанных на методе оптической эмиссионной спектроскопии с тлеющим разрядом.

Ключевые слова: циркониевый сплав, водород, стандартный образец, калибровочная (градуировочная) характеристика, спектрометр эмиссионный тлеющего разряда

Ссылка при цитировании: Спиридонова А. А., Кудияров В. Н., Лаптев Р. С. К вопросу о построении калибровочной кривой с помощью спектрометра эмиссионного тлеющего разряда для измерений содержания водорода в сплавах циркония // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 1. С. 85–92. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-1-85-92>.

Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 23.01.2024; принята к публикации 25.03.2024.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Research Article

On the Construction of a Calibration Curve Using a Glow Discharge Emission Spectrometer for Measuring the Hydrogen Content in Zirconium Alloys

Alena A. Spiridonova^{1,2}  , Viktor N. Kudiiarov¹ , Roman S. Laptev¹ 

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

 spiridonova@tcsms.tomsk.ru

² State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in the Tomsk Region, Tomsk, Russia

Abstract: One of the main directions of modern activity of metrology researchers is to provide the real sector of the economy of the Russian Federation with reference materials that have no analogues in the country. The article discusses the research of highly efficient materials for fuel cladding (fuel elements) in the active zones of thermal reactors, the scope of which is wide. The purpose of the study is the development of samples of the composition of the zirconium alloy to establish and control the stability of the calibration curves of spectrometers when determining the mass fraction of hydrogen, provided that the metrological and technical characteristics of the reference material meet the requirements of the measurement procedure. The main methods for determining the hydrogen content in materials are analyzed. It has been established that the method of glow discharge optical emission spectroscopy has found the widest application. It has also been established that zirconium alloys are chosen as the main material in most cases.

The need to create samples for constructing a calibration curve for spectrometers for measuring the hydrogen content in a zirconium alloy is noted. Samples of zirconium alloy Zr-1Nb (grade З110) have been developed to construct a calibration curve using a glow discharge emission spectrometer for measurements with a mass fraction of hydrogen from 0.034 to 0.498 %. Calibration is carried out using the developed samples to obtain a calibration curve using the example of an emission glow discharge spectrometer of the GD Profiler2 type. The relative error of the hydrogen mass fraction obtained during calibration does not exceed $\pm 10\%$.

The practical significance of the study lies in the development of samples that can be used to calibrate spectrometers based on the method of glow discharge optical emission spectroscopy.

Keywords: zirconium alloy, hydrogen, reference material, calibration curve, glow discharge emission spectrometer

For citation: Spiridonova A. A., Kudiiarov V. N., Laptev R. S. On the construction of a calibration curve using a glow discharge emission spectrometer for measuring the hydrogen content in zirconium alloys. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(1):85–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-1-85-92>.

The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 23.01.2024; accepted for publication 25.03.2024.

Введение

Цирконий (Zr) обладает рядом преимуществ: имеет низкое сечение поглощения тепловых нейтронов; сохраняет механические свойства при высоких температурах. Благодаря вышеперечисленным характеристикам, а также высокой коррозионной стойкости циркониевые сплавы широко используются в качестве

основного материала для конструктивных элементов современных тепловых реакторов, в том числе – для оболочек твэлов в их активных зонах [1]. В процессе эксплуатации материал оболочки твэла постепенно разрушается под воздействием различных экологических факторов. Например – поглощения водорода из окружающей легкой/тяжелой воды, выступающей

в качестве замедлителя, или радиационного повреждения, вызванного постоянной бомбардировкой высокоэнергетическими частицами, высвобождающимися в процессе деления [2, 3]. Технические характеристики металлов и сплавов в высшей степени зависимы от концентрации газообразующих примесей, например, водорода. Проникновение и накопление водорода способно привести к значительным изменениям механических свойств материалов и даже – к их разрушению. Присутствие водорода может отрицательно сказаться на долговечности циркония. Механизмы разрушения включают образование хрупких гидридов [4], замедленное гидридное растрескивание [5] и локальную пластичность, усиленную водородом [6]. Гидриды образуются из-за низкого предела растворимости водорода в цирконии, что способствует его образованию даже при относительно низких концентрациях водорода [7].

Растворение водорода в металле характеризуется его неравномерным распределением от поверхности в глубину [8]. Это неравномерное распределение водорода объясняет различную степень повреждения материала от поверхности до глубины. При этом многие лаборатории мира разрабатывают и изучают новые защитные покрытия от проникновения водорода. В связи с этим очень важно проводить элементный анализ структуры материала и поверхностных слоев.

Исследования по характеристике высокоэффективных материалов ставят новые аналитические задачи, требующие новых эффективных методов. Среди них все большее значение в настоящее время приобретают тлеющие разряды (GD) в сочетании с оптико-эмиссионной спектроскопией (OES) [9, 10]. В частности, GDOES является довольно хорошо зарекомендовавшим себя методом, обеспечивающим высокое разрешение по глубине, многоэлементный анализ, высокую пропускную способность и низкие пределы обнаружения с минимальными матричными эффектами [11]. Основными преимуществами

GDOES в этих исследованиях являются возможность определения водорода и высокая скорость анализа.

К сожалению, GDOES имеет ряд недостатков, таких как серьезные требования к геометрической форме, размеру и электропроводимости образцов. Проведенный авторами анализ сведений, представленных в ФИФ ОЕИ¹ по состоянию на май 2023 г., свидетельствует об отсутствии достаточного количества СО с аттестованными значениями массовой доли водорода в циркониевых сплавах с установленной прослеживаемостью к ГПЭ, так необходимых для метрологического обеспечения исследований высокоэффективных материалов для оболочек твэлов в активных зонах тепловых реакторов.

Целью настоящего исследования являлась разработка нового образца состава массовой доли водорода в циркониевом сплаве для установления и контроля стабильности калибровочной (градуировочной) характеристики GD-спектрометра.

В задачи исследования входило следующее: обоснование выбора вещества-кандидата на роль образца сравнения, подготовка образца сравнения, гидрирование, определение массовой доли водорода в образцах сравнения, установление и контроль стабильности калибровочной (градуировочной) характеристики спектрометра эмиссионного тлеющего разряда типа GD Profiler2 с использованием полученных образцов, анализ полученных результатов.

Материалы и методы

Реактивы, растворы и материалы

В качестве материала-кандидата СО использовали сплав циркония Zr1Nb марки Э110. В табл. 1 указан элементный состав данного сплава, заявленный производителем.

¹ ФИФ ОЕИ – Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений: официальный сайт. <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry>

Таблица 1. Элементный состав сплава Zr1Nb (марка Э110 [13])
Table 1. The elemental composition of the Zr1Nb alloy (grade Э110 [13])

Элемент	Массовая доля, %	Элемент	Массовая доля, %	Элемент	Массовая доля, %	Элемент	Массовая доля, %
Zr	≈98,68	Si	0,02	Ni	0,007	Ti	0,005
Nb	0,9–1,1	Cr	0,02	N	0,006	K	0,004
O	0,1 (max)	C	0,02	Cu	0,005	Cl	0,002
Fe	0,05	Ca	0,01	Mo	0,005	Mn	0,002
Hf	0,05	Al	0,008	Pb	0,005	Li	0,0008

При выполнении измерений использовали следующие расходные материалы: водород газообразный особой чистоты марки 5.0 и аргон газообразный особой чистоты марки 5.0. Фактическое значение объемной доли водорода в баллоне составляет 99,999 %, также присутствуют примеси кислорода и азота, не превышающие по содержанию 0,001 %. Фактическое значение объемной доли аргона в баллоне составляет 99,999 %, остальной объем занимают примеси кислорода, азота, водорода, метан и углекислый газ.

Оборудование

Гидрирование проводили на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller [12] по методу Сиверта. Аппарат типа Сиверта представляет собой газовую систему, по которой распределяется водород в соответствии с выбранной методикой измерений. Газовая система включает в себя эталонный резервуар для накопления водорода и реакционную камеру, внутри которой производится взаимодействие водорода с материалом при заданных условиях [13, 14].

В качестве спектрометра для построения калибровочной (градуировочной) характеристики использовался спектрометр эмиссионного тлеющего разряда типа GD Profiler2 производства Horiba Jobin Yvon S. A.S (Франция). Принцип действия спектрометра основан на измерении интенсивности линий в спектре эмиссионного излучения ионизированных атомов анализируемых элементов, возбуждаемого в низкотемпературной аргоновой плазме. Содержание элементов в образце определяется по градуировочным зависимостям между интенсивностью эмиссионного излучения и содержанием элемента в образце. Длина волны эмиссионной линии водорода составляет 121,574 нм.

Пробоподготовка исходного материала CO

Квадратные образцы размером 20×20×1 мм были отполированы до средней шероховатости $R_a = 0,045$ мкм в связи с тем, что состояние поверхности сильно влияет на проникновение водорода в материал. Затем образцы были отожжены при температуре $T_a = 580$ °C в течение $t_a = 180$ минут для снятия внутренних напряжений и структурных дефектов.

Методы и процедура исследований

Гидрирование проводили из атмосферы водорода при температуре $T_h = 600$ °C и давлении $P_h = 0,66$ атм на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller [12] по методу Сиверта. При гидрировании каждой серии в камеру было помещено одновременно три

образца. Гидрирование проводили для получения 7 различных массовых долей водорода в CO. Средняя скорость сорбции составила $5,02 \cdot 10^{-8}$ м³/(см²·с). Различные массовые доли водорода были достигнуты путем изменения времени гидрирования. На рис. 1 представлена зависимость массовой доли водорода от времени гидрирования.

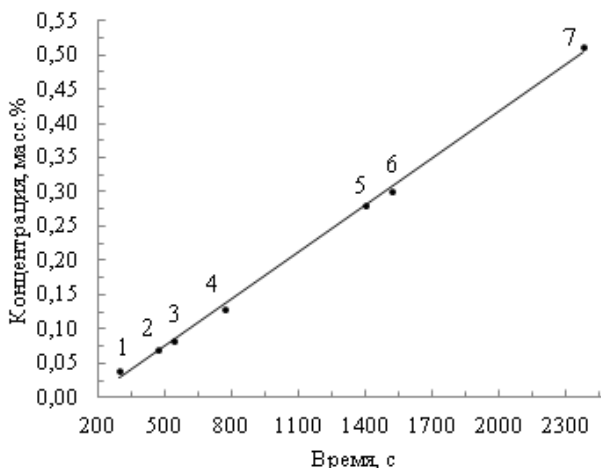


Рис. 1. Зависимость массовой доли водорода от времени гидрирования

Fig. 1. Dependence of the mass fraction of hydrogen on the hydrogenation time

После насыщения для достижения равномерного распределения водорода по объему образца выдерживали в атмосфере инертного газа (аргон²) при температуре $T_i = 650$ °C и давлении $P_i = 0,66$ атм в течение $t_i = 5$ часов, после чего температура снижалась со скоростью 2 °C/мин в течение 3 часов. Массовую долю водорода определяли волюметрическим методом и по изменению массы образца. При волюметрическом методе изменение массовой доли водорода в образце рассчитывается по изменению давления и температуры во время гидрирования на основе уравнения состояния. Расчеты производятся автоматически с помощью ПО автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller.

Результаты определения массовой доли водорода и их среднеквадратичные отклонения приведены в табл. 2. Значения массовых долей водорода, полученные разными методами, различаются друг от друга

² Циркониевый сплав Э110 не сорбирует аргон, потому что (1) аргон – инертный химически не активный газ; (2) размеры атома аргона больше, чем междоузлия, в которых растворяются примесные атомы (кислород, азот, водород). Кроме того, в результате отжига в аргоне не происходит увеличение массы образца и не наблюдается аргон внутри образца при изучении элементного состава.

Таблица 2. Результаты определения концентрации водорода
Table 2. The results of the determination of hydrogen concentration

Образец	1	2	3	4	5	6	7
Массовая доля водорода, определенная по изменению массы, %	0,034 ± 0,002	0,069 ± 0,001	0,082 ± 0,001	0,129 ± 0,001	0,282 ± 0,001	0,302 ± 0,001	0,515 ± 0,001
Массовая доля водорода, определенная волюметрическим методом, %	0,035 ± 0,010	0,069 ± 0,010	0,082 ± 0,010	0,129 ± 0,010	0,280 ± 0,010	0,300 ± 0,010	0,510 ± 0,010

не более чем на 1 %, тем самым обеспечивая хорошую сходимость между собой. Для построения калибровочной (градуировочной) зависимости средств измерений использовались образцы с концентрацией водорода, полученные по изменению массы образца.

Установление метрологических характеристик материала кандидата СО

После проведения измерений массовой доли водорода по полученным образцам была построена калибровочная (градуировочная) зависимость массовой доли водорода от интенсивности эмиссионного излучения (рис. 2).

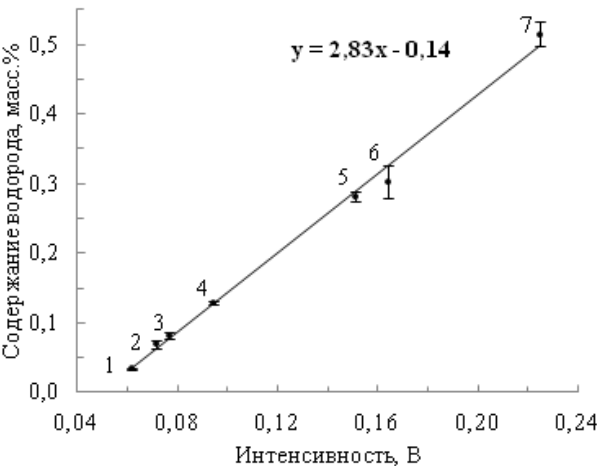


Рис. 2. Градуировочная зависимость H₂ (121,574)
Fig. 2. The calibration dependence of H₂ (121,574)

Полученные значения массовой доли водорода находятся в диапазоне от 0,034 до 0,498 %. Эти значения практически совпадают с заявленными (табл. 2). Последовательность образцов от наименьшей концентрации водорода (образец 1) к наибольшей (образец 7) соблюдается.

Данная градуировочная зависимость описывается уравнением 1:

$$y = 2,83x - 0,14. \tag{1}$$

Остаточная дисперсия аппроксимирующей линейной зависимости оценивалась по формуле 2:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 = 0,0009. \tag{2}$$

В табл. 3 представлены результаты определения концентрации водорода по градуировочной зависимости.

Как видно из табл. 3, относительная погрешность полученного при калибровочной (градуировочной) характеристике значения массовой доли водорода не превышает 10 %.

Результаты и обсуждение

При разработке высокоэффективных материалов для оболочек твэлов в активных зонах ядерных реакторов в качестве материала широко применяются сплавы циркония. Одной из причин разрушения оболочек является охрупчивание, вызванное высоким содержанием водорода в активной зоне. Для контроля влияния водорода на материал широко применяется метод

Таблица 3. Результаты определения массовой доли водорода
Table 3. The results of the determination of the mass fraction of hydrogen

Образец	1	2	3	4	5	6	7
Интенсивность эмиссионного излучения, В	0,061	0,072	0,077	0,094	0,151	0,164	0,225
Массовая доля водорода, %	0,034	0,063	0,077	0,127	0,288	0,325	0,498
Относительная погрешность, %	0,88	-8,93	-5,65	-1,81	2,37	7,65	-3,27

оптической эмиссионной спектроскопии в тлеющем разряде. Установки, реализующие данный метод, требуют построения калибровочной (градуировочной) характеристики по образцам сравнения. В данной работе для контроля точности определения массовой доли водорода были разработаны образцы сравнения из циркониевого сплава Zr-1Nb марки З110, были построены калибровочные (градуировочные) характеристики по водороду на примере спектрометра эмиссионного тлеющего разряда типа GD Profiler2.

В результате были подготовлены серии образцов размером $20 \times 20 \times 1$ мм с массовой долей водорода от 0,034 до 0,498 %. Гидрирование проводили в атмосфере водорода при температуре $T_h = 600$ °C и давлении $P_h = 0,66$ атм. на автоматизированном комплексе Automated Complex Gas Reaction Controller по методу Сиверта.

Затем была построена калибровочная (градуировочная) зависимость спектрометра. Остаточная дисперсия аппроксимирующей линейной зависимости составила 0,0009. Установлено, что полученные значения массовой доли водорода по градуировочной зависимости отличаются от исходных не более чем на 10 %.

Заключение

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в разработке новых образцов массовой доли водорода в циркониевых сплавах, позволяющих повысить точность проводимых исследований при разработке высокоэффективных материалов для оболочек ТВЭЛов в активных зонах тепловых реакторов.

Отмечая практическую значимость, можно говорить о расширении возможностей установления и контроля точности и стабильности градуировочной характеристики GD-спектрометров. Разработанные образцы могут применяться для установления и контроля стабильности калибровочной (градуировочной) характеристики спектрометров, работающих по методу оптической эмиссионной спектроскопии в тлеющем разряде.

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что относительная погрешность градуировочной характеристики спектрометра эмиссионного тлеющего разряда для измерений массовой доли водорода в сплавах циркония не превышает ± 10 %. Полученные результаты после проведения испытаний в целях утверждения типа СО разработанные образцы массовой доли водорода в циркониевых сплавах могут быть внесены в ФИФ ОЕИ и применяться в сфере обеспечения единства измерений.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта № FSWW-2023–0005.

Acknowledgments: The work was supported by the State Assignment «Science» within the framework of the scientific project No. FSWW-2023–0005.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: The author declares no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Puls M. P.* The effect of hydrogen and hydrides on the integrity of zirconium alloy components: delayed hydride cracking. London: Springer, 2012. 452 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4195-2>
2. Positron annihilation spectroscopy study of defects in hydrogen loaded Zr-1Nb alloy / *J. Bordulev* [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 798. P. 685–694. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.186>
3. Microstructure and hydride embrittlement of zirconium model alloys containing niobium and tin / *S. J. Oh* [et al.] // Materials Science and Engineering. 2011. Vol. 528. Iss. 10. P. 3771–3776. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.093>
4. On the role of hydrogen filled vacancies on the embrittlement of zirconium: An ab initio investigation / *P. A. T. Olsson* [et al.] // Journal of Nuclear Materials. 2015. Vol. 467. Part 1. P. 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.09.056>
5. *Northwood D. O., Kosasih U.* Hydrides and delayed hydrogen cracking in zirconium and its alloys // International Metals Reviews. 1983. Vol. 28. Iss. 1. P. 92–121. <https://doi.org/10.1179/imtr.1983.28.1.92>
6. Hydrogen interactions with defects in crystalline solids / *S. M. Myers* [et al.] // Reviews of Modern Physics. 1992. Vol. 64. Iss. 2. P. 559–617. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.64.559>
7. Hydrogen and vacancy clustering in zirconium / *C. Varvenne* [et al.] // Acta Materialia. 2015. Vol. 102. P. 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.09.019>
8. Investigation of hydrogen distribution from the surface to the depth in technically pure titanium alloy with the help of glow discharge optical emission spectroscopy / *A. M. Lider* [et al.] // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 302. P. 92–96. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.302.92>
9. Quantitative depth profile analysis of metallic coatings by pulsed radiofrequency glow discharge optical emission spectrometry / *P. Sánchez* [et al.] // Analytica chimica acta. 2011. Vol. 684. Iss. 1. P. 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.10.039>

10. Glow discharge optical emission spectroscopy: A practical guide / R. Payling [et al.]. Cambridge (UK): RSC Analytical Spectroscopy Monographs, 2003. <https://doi.org/10.1039/9781847550989>
11. Marcus R. K., Broekaert J. A. C. Glow discharge plasmas in analytical spectroscopy // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2003. Vol. 22, Iss. 3. P. 186 [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(03\)00307-8](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)00307-8)
12. Kudiiarov V. N., Lider A. M., Harchenko S. Y. Hydrogen accumulation in technically pure titanium alloy at saturation from gas atmosphere // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 880. P. 68–73. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.68>
13. Andreasen A. Design and building of a new experimental setup for testing hydrogen storage materials // *Risø-Report*. 2005. P. 52. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32450.99527>
14. Checchetto R., Trettel G., Miotello A. Sievert-type apparatus for the study of hydrogen storage in solids // *Measurement Science and Technology*. 2003. Vol. 15, Iss. 1. P. 127–130. DOI:10.1088/0957-0233/15/1/017

REFERENCE

1. Puls M. P. The effect of hydrogen and hydrides on the integrity of zirconium alloy components: delayed hydride cracking. London: Springer; 2012. 452 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4195-2_6
2. Bordulev J., Kudiiarov V., Svyatkin L., Syrtanov M., Stepanova E., Čížek J. et al. Positron annihilation spectroscopy study of defects in hydrogen loaded Zr-1Nb alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;798:685–694. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.186>
3. Oh S. J., Jang C., Kim J. H., Jeong Y. H. Microstructure and hydride embrittlement of zirconium model alloys containing niobium and tin. *Materials Science and Engineering*. 2011;528(10):3771–3776. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.093>
4. Olsson P. A. T., Kese K., Holston A. M. A. On the role of hydrogen filled vacancies on the embrittlement of zirconium: An ab initio investigation. *Journal of Nuclear Materials*. 2015;467:311–319. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.09.056>
5. Northwood D. O., Kosasih U. Hydrides and delayed hydrogen cracking in zirconium and its alloys. *International Metals Reviews*. 1983;28(1):92–121. <https://doi.org/10.1179/imtr.1983.28.1.92>
6. Myers S. M., Baskes M. I., Birnbaum H. K., Corbett J. W., Deleo G. G., Estreicher S. K. et al. Hydrogen interactions with defects in crystalline solids. *Reviews of Modern Physics*. 1992;64(2):559–617. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.64.559>
7. Varvenne C., Mackain O., Provile L., Clouet E. Hydrogen and vacancy clustering in zirconium. *Acta Materialia*. 2015;102:56–69. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.09.019>
8. Lider A. M., Pushilina N. S., Kudiiarov V. N., Kroening M. Investigation of hydrogen distribution from the surface to the depth in technically pure titanium alloy with the help of glow discharge optical emission spectroscopy. *Applied Mechanics and Materials*. 2013;302:92–96. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.302.92>
9. Sánchez P., Fernández B., Menéndez A., Orejas J., Pereiro R., Sanz-Medel A. Quantitative depth profile analysis of metallic coatings by pulsed radiofrequency glow discharge optical emission spectrometry. *Analytica chimica acta*. 2011;684(1):47–53. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.10.039>
10. Payling R., Nelis Th., Browner R. F., Chalmers Jo. M., Cresser M. S., Monaghan Jo. J. et al. Glow discharge optical emission spectroscopy: A practical guide. Cambridge (UK): RSC Analytical Spectroscopy Monographs; 2003. <https://doi.org/10.1039/9781847550989>
11. Marcus R. K., Broekaert J. A. C. Glow discharge plasmas in analytical spectroscopy. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2003;22(3):186. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(03\)00307-8](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)00307-8)
12. Kudiiarov V. N., Lider A. M., Harchenko S. Y. Hydrogen accumulation in technically pure titanium alloy at saturation from gas atmosphere. *Advanced Materials Research*. 2014;880:68–73. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.68>
13. Andreasen A. Design and building of a new experimental setup for testing hydrogen storage materials. *Risø-Report*; 2005. P. 52. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32450.99527>
14. Checchetto R., Trettel G., Miotello A. Sievert-type apparatus for the study of hydrogen storage in solids. *Measurement Science and Technology*. 2003;15(1):127–130. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/1/017>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Об обеспечении единства измерений: Федер. закон Рос. Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собрания Рос. Федерации 11 июня 2008 г.: одобрен Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 18 июня 2008 г. (в ред. от 11.06.2021 № 170-ФЗ) // КонсультантПлюс [сайт]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ (дата обращения: 20.07.2023).

ФИФ ОЕИ – Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений: официальный сайт. <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Спиридонова Алена Александровна – аспирант Инженерной школы ядерных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; инженер по метрологии ФБУ «Томский ЦСМ»
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30
e-mail: spiridonova@tcsms.tomsk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5679-4861>

Кудияров Виктор Николаевич – канд. техн. наук, доцент отделения экспериментальной физики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30
e-mail: kudiyarov@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0901-2409>

Роман Сергеевич Лаптев – канд. техн. наук, доцент отделения экспериментальной физики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30
e-mail: laptevrs@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5248-2839>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alena A. Spiridonova – postgraduate student of the School of Nuclear Technology, National Research Tomsk Polytechnic University; Metrology Engineer, FBU «Tomsk CSM»
30 Lenina ave., Tomsk, 634050, Russia
e-mail: spiridonova@tcsms.tomsk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5679-4861>

Viktor N. Kudiyarov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Experimental Physics, National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenina ave., Tomsk, 634050, Russia
e-mail: kudiyarov@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0901-2409>

Roman S. Laptev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Experimental Physics, National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenina ave., Tomsk, 634050, Russia
e-mail: laptevrs@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5248-2839>