

СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Научная статья

УДК 543.272.2:681.2.089:53.089.68

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-3-29-40>



Стандартные образцы для градуировки анализатора водорода при высокой концентрации

А. А. Спиридонова^{1, 2}  , В. Н. Кудияров² , А. М. Лидер² 

¹ Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Томской области, г. Томск, Россия
 spiridonova@tcsms.tomsk.ru

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия

Аннотация: В данном исследовании рассматриваются вопросы повышения точности при измерении высоких концентраций водорода при разработке материалов-накопителей в водородной энергетике. Цель исследования – разработка стандартных образцов для градуировки анализаторов водорода при высоких концентрациях. Проанализированы основные методы определения содержания водорода в материалах, установлено, что экстракционный метод в среде инертного газа нашел наиболее широкое применение. Отмечена необходимость градуировки анализаторов по стандартным образцам с высокой концентрацией водорода. Разработаны стандартные образцы из титанового сплава BT-1-0 с концентрацией водорода до $(4,0 \pm 0,1)$ масс.%. Подобраны оптимальные параметры проведения анализа. На примере анализатора водорода RHEN602 (LECO, США) проведена градуировка по разработанным стандартным образцам с получением градуировочной зависимости. Оценена надежность полученной градуировочной прямой с использованием стехиометрического гидрида циркония. Доверительный интервал полученной градуировочной прямой составил $\pm 10\%$. Установлено, что проведение градуировки по разработанным образцам позволяет проводить анализ материалов с содержанием водорода от 0,5 до 4,0 масс.%. Практическая значимость исследования заключается в разработке стандартных образцов, которые могут быть применены для проведения градуировки анализаторов водорода, работающих по принципу плавления в среде инертного газа, при высокой концентрации водорода.

Ключевые слова: анализатор водорода, водород, стандартный образец, титановый сплав, градуировка, экстракционный метод, концентрация, гидрирование

Ссылка при цитировании: Спиридонова А. А., Кудияров В. Н., Лидер А. М. Стандартные образцы для градуировки анализатора водорода при высокой концентрации // Эталоны. Стандартные образцы. 2022. Т. 18, № 3. С. 29–40. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-3-29-40>

Статья поступила в редакцию 30.08.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 25.09.2022.

REFERENCE MATERIALS

Research Article

Development of Reference Materials for Calibration of the Hydrogen Analyzer at High Concentration

Alena A. Spiridonova^{1,2}  , Viktor N. Kudiiarov² , Andrey M. Lider² 

¹State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in the Tomsk Region, Tomsk, Russia

 spiridonova@tcsms.tomsk.ru

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract: The study discusses the issues of improving the accuracy of measuring high hydrogen concentrations in the development of storage materials in the hydrogen energy industry. The purpose of the study was to develop reference materials for calibration of the hydrogen analyzers at high concentrations. The main methods for determining the hydrogen content in materials were analyzed. It was established that the extraction method in an inert gas medium has found the widest application. The main methods for determining the hydrogen content in materials are analyzed, it is established that the extraction method in an inert gas medium has found the widest application. The need for calibration of analyzers on reference materials with a high hydrogen concentration was noted. Reference materials of titanium alloy VT-1-0 with hydrogen concentration up to (4.0 ± 0.1) wt.% have been developed. The optimal parameters for the analysis were selected. On the example of the hydrogen analyzer RHEN602 (LECO, USA), calibration was carried out on the developed reference materials to obtain a calibration dependence. The reliability of the obtained calibration curve with the application of stoichiometric zirconium hydride was estimated. The confidence interval of the resulting calibration curve was $\pm 10\%$. It has been established that the calibration on the developed materials makes it possible to analyze materials with a hydrogen content of 0.5 to 4.0 wt.%. The practical significance of the study lies in the development of reference materials that can be applied to calibrate hydrogen analyzers operating on the principle of melting in an inert gas medium at a high hydrogen concentration.

Keywords: hydrogen analyzer, hydrogen, reference material, titanium alloy, calibration, extraction method, concentration, hydrogenation

For citation: Spiridonova A. A., Kudiiarov V. N., Lider A. M. Development of Reference Materials for Calibration of the Hydrogen Analyzer at High Concentration. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2022;18(3):29–40. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-3-29-40> (In Russ.).

The article was submitted 30.08.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 25.09.2022.

Введение

Разработка перспективных материалов для хранения водорода является одной из важных задач развития водородной энергетики [1–5]. Перспективные материалы-аккумуляторы водорода должны иметь оптимальный элементный и фазовый состав, чтобы обладать высокими скоростями сорбции и десорбции водорода, аккумулировать большое количество водорода и быть циклически стабильными [6–10]. Гидриды

металлов обладают такими свойствами, как высокая объемная плотность атомов водорода в матрице, широкий диапазон рабочих давлений и температур, каталитическая активность и ряд других, являются наиболее используемыми материалами для хранения водорода [11–19]. Интерметаллические соединения на основе гидридообразующих металлов Zr, Ti, Pd, V способны аккумулировать до 4 масс.% водорода [20–29]? в связи с чем широко применяются при хранении водорода.

Измерение концентрации водорода в материалах для хранения водорода является важным этапом разработки и испытаний материалов.

В настоящее время для измерения концентрации водорода в металлах используются следующие методы: эмиссионная спектроскопия, спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, активационный анализ заряженных частиц, масс-спектральный анализ, высокотемпературный вакуумный отжиг с масс-спектрометрической регистрацией водорода, экстракционный метод в среде инертного газа с определением содержания водорода с помощью термокондиметрической ячейки по градуировочной линии. При этом последний нашел наиболее широкое применение как в научных лабораториях, так и в промышленности [30, 31].

Одним из методов измерения концентрации водорода в материале, который нашел широкое применение, является метод экстракции в среде инертного газа. Применение метода экстракции водорода в среде инертного газа позволяет с высокой точностью определять концентрацию водорода (количественный анализ) с помощью градуировочной линии, а также путем анализа формы кривой экстракции (число максимумов на кривой, максимальные ширина и высота). Таким образом, состояние водорода в материале (качественный анализ) можно оценить аналогично методу термостимулированной десорбции [32–36].

Одним из приборов, в котором реализован метод экстракции водорода в среде инертного газа, является анализатор водорода серии RHEN602 фирмы LECO. Однако для проведения испытаний в области водородной энергетики концентрация водорода в образцах может достигать до 4 масс.%. Поэтому при анализе аккумулирующих материалов с высокой концентрацией водорода на анализаторах водорода серии RHEN602 можно столкнуться с двумя трудностями.

Первая трудность заключается в том, что при измерении образцов с содержанием водорода, существенно более высоким, чем у стандартных калибровочных образцов, возникают большие погрешности. Для решения этой проблемы необходимо разработать стандартные образцы с высокими содержаниями водорода и провести градуировку анализатора с использованием разработанных образцов.

Вторая трудность, которая может возникнуть при анализе образцов с высокой концентрацией водорода, – это превышение верхнего порога чувствительности термокондиметрической ячейки анализатора. Это происходит, когда образец с высоким содержанием водорода очень быстро плавится и большое количество

водорода попадает в ячейку за короткий промежуток времени. Происходит быстрое плавление анализируемого образца, так как при стандартизированном анализе ток, проходящий через образец, сразу имеет максимальное значение. Решением этой проблемы может стать постепенное, ступенчатое увеличение силы тока от некоторого начального значения до максимального. Это приведет к более градиентному извлечению водорода из образца без превышения верхнего порога чувствительности термокондиметрической ячейки и позволит проводить анализ образцов с высоким содержанием водорода, включая анализ формы кривой экстракции.

Таким образом, целью настоящего исследования являлась разработка стандартных образцов с высокими содержаниями водорода и градуировка анализатора водорода по разработанным образцам. Для достижения сформулированной цели решались следующие задачи: подготовка образцов с известными высокими концентрациями водорода; подбор оптимальных параметров анализа образцов с высокой концентрацией водорода, чтобы не превышался верхний порог чувствительности ячейки теплопроводности; градуировка анализатора водорода RHEN602 фирмы LECO по подготовленным образцам и выбранным оптимальным параметрам и проверка эффективности разработанной методики на различных образцах материалов-аккумуляторов водорода.

Материалы и методы

Процедура создания стандартных образцов включает пять основных этапов: подготовка образцов, отжиг, гидрирование и выдержка в атмосфере инертного газа. После проведения серий насыщения исследуемого материала была проведена градуировка анализатора с построением градуировочной зависимости. В данной работе в качестве материала для разработки стандартных образцов выбран технически чистый титановый сплав BT-1–0 [37–45], так как он характеризуется высокими скоростями сорбции при гидрировании, стабильным состоянием, экономичностью, доступностью и безопасностью в обращении.

Образцы изготавливались из проволоки высотой 3 мм и диаметром 2,5 мм. Для изготовления градуировочных образцов с высокой концентрацией (до 4 масс.%) использовался технически чистый порошок титана.

Подготовка образцов заключалась в их обработке на наждачной бумаге для удаления окисной пленки и подготовки поверхности к дальнейшему

эксперименту. После чего образцы подвергались отжигу при температуре 750 °С в течение 60 минут.

Насыщение образцов водородом проводилось на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller при температуре 600 °С и давлении 2 атм. в течение часа. Данная установка позволяет насыщать образцы водородом из газовой среды при максимальной температуре 900 °С и максимальном давлении 50 атм. Различные концентрации водорода были достигнуты путем изменения времени гидрирования.

Концентрация водорода определялась волюметрическим методом и по изменению массы после введения водорода. Волюметрический метод определения концентрации водорода, сорбированного образцом, заключается в определении количества водорода по его давлению и температуре в реакционной камере в процессе наводороживания. Подробное описание волюметрического метода определения концентрации водорода представлено в [46]. В работе использовались только те образцы, для которых разница между значениями концентрации водорода, определенными волюметрическим методом и по изменению массы, не превышала 5 % от значения концентрации.

Количество образцов в одной серии составило 18 штук (за исключением серии 6). Концентрации водорода, определенные волюметрическим методом, полученной серии градуировочных образцов представлены в табл. 1.

Результаты

Выбор геометрического размера образцов основывался на проведенном анализе по определению предельного количества атомов водорода анализатора до превышения порога чувствительности. Для этого были подготовлены образцы титана различной массы и с различным содержанием водорода, в табл. 2 представлены расчеты количества атомов водорода в подготовленных образцах.

По представленным расчетным данным было установлено, что максимальное количество атомов водорода, при котором не происходит превышение порога чувствительности анализатора, составляет $1,9 \cdot 10^{21}$, данному количеству атомов водорода соответствует масса водорода равная $3,14 \cdot 10^{-3}$ г. Затем с учетом этих значений, было рассчитано содержание водорода в образцах различной высоты.

Таблица 1. Серии градуировочных образцов
Table 1. The series of calibration samples

Серия	Содержание, масс.%	Серия	Содержание, масс.%
1	0,643±0,035	4	1,559±0,084
2	1,068±0,057	5	1,860±0,010
3	1,125±0,060	6	4,000±0,205

Таблица 2. Расчет количества атомов водорода в подготовленных образцах
Table 2. The calculation of the number of hydrogen atoms in the prepared samples

Номер измерения	Масса образца, г	Содержание водорода, масс.%	Масса водорода · 10 ⁻³ , г	Кол-во атомов водорода · 10 ²¹	Порог чувствительности
1	0,032	1,61	0,53	0,32	
2	0,035	1,73	0,62	0,37	
3	0,069	1,51	1,06	0,63	
4	0,151	2,03	3,14	1,9	
5	0,187	1,74	3,30	2,0	превышен
6	0,245	1,49	3,71	2,2	превышен
7	0,306	1,20	3,72	2,2	превышен

Для начала рассчитывался объем цилиндров по формуле:

$$V = \pi h r^2, \quad (1)$$

где h – предполагаемая высота цилиндров, которая варьировалась в пределах от 0,1 до 10 мм; r – радиус проволоки, равный 1,23 мм.

Затем рассчитывалась предполагаемая масса образцов по формуле:

$$m = V \cdot \rho, \quad (2)$$

где V – объем цилиндров, см³; ρ – плотность титана, равная 4,54 г/см³.

Далее для каждого значения высоты с шагом 0,1 см рассчитывалась концентрация водорода по формуле:

$$C = \frac{m_H}{m_H + m} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Проведенные расчеты представлены в табл. 3.

Из представленных результатов видно, что высота образцов, соответствующая значению 0,3 см, является оптимальной как по изготовлению, так и по насыщению без превышения порога чувствительности.

Для того чтобы иметь возможность измерять высокие концентрации водорода без превышения порога чувствительности, необходимо подобрать оптимальные параметры измерения, при которых скорость экстракции водорода не будет превышать предельную ступень, после которой происходит превышение порога

чувствительности. В качестве исследуемых параметров были рассмотрены сила тока, время нагрева печи, время интегрирования и анализа.

Для проведения анализа образцов с высокой концентрацией водорода, чтобы не превышался верхний порог чувствительности термокондиметрической ячейки, следует использовать ступенчатый нагрев. Для данного метода необходимо установить начальное значение силы тока, с которого будет производиться анализ. Данное начальное значение подбирается по степени плавления плавня. В качестве плавня в этом анализаторе использовалось олово. Плавень используется для равномерного распределения тепла по всему объему твердого образца и для удержания сыпучей пробы, чтобы она не выдулась из тигля во время анализа. Установлено, что плавление плавня начинается при температуре 200 °С, что соответствует силе тока 170 А. Необходимо также отметить, что при проведении анализа сила тока не должна превышать 700 А, так как при данной силе тока происходит процесс дегазации. Поэтому в качестве предельного значения силы тока было выбрано значение 650 А.

Анализ работ [12–16] показал, что первый пик десорбции водорода титановым сплавом наблюдается при температуре 600 °С. Эта температура соответствует фазовой границе между областями существования фаз δ и $\beta + \delta$. Следовательно, на этой стадии происходит диссоциация гидридов, находящихся в материале. Другой высокотемпературный пик, лежащий в интервале температур от 690 °С до 720 °С, соответствует

Таблица 3. Содержание водорода в зависимости от расчета высоты исследуемых образцов
Table 3. The hydrogen content depending on the calculation of the height of the studied samples

Высота проволоки h , см	Объем цилиндра V , см ³	Масса образца, г	Содержание водорода, масс.%
0,1	0,005	0,02	12,7949
0,2	0,010	0,04	6,8347
0,3	0,014	0,06	4,6627
0,4	0,019	0,09	3,5383
0,5	0,024	0,11	2,8508
0,6	0,029	0,13	2,3870
0,7	0,033	0,15	2,0530
0,8	0,038	0,17	1,8010
0,9	0,043	0,19	1,6041
1	0,048	0,21	1,4460

переходу из α -фазы в β -фазу. Был проведен предварительный этап исследования по определению температурной зависимости для каждого пика водорода при определении содержания водорода методом плавления в среде инертного газа при ступенчатом нагреве печи с шагом 100 °С.

Таким образом, после проведенного эксперимента было установлено, что первый пик соответствует диссоциации гидридов. Однако высокотемпературный пик соответствует температуре 1000 °С. Исходя из этого был сделан вывод, что шаг нагрева 100 °С является оптимальным для проведения анализа.

Далее необходимо подобрать параметры времени. Время анализа складывается из времени нагрева и выдержки при постоянной силе тока. Основным подбором параметров времени является продолжительность анализа, который не должен занимать много времени. Предполагалось, что время нагрева не должно превышать и быть равным времени выдержки. Минимальное время нагрева составило 10 секунд, но данного времени недостаточно для нагрева каждой ступени. Поэтому было выбрано время нагрева 15 секунд, так как при данном времени водород равномерно регистрируется датчиком. Подбор времени выдержки начинался с 15 секунд, но чем выше сила тока, тем сильнее нагревается образец и во время выдержки при заданной силе тока происходит превышение порога чувствительности. Как уже было отмечено, процесс анализа не должен занимать много времени, поэтому оптимальным временем выдержки было выбрано 20 секунд, а нагрева – 15 секунд.

Погрешности определения концентрации водорода в полученных стандартных образцах рассчитывались для прямых многократных измерений с доверительной вероятностью $P=0,95\%$ в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011. Результаты приведены в табл. 4.

С использованием представленных образцов в табл. 1 была получена градуировочная зависимость, показанная на рис. 1а, типичный вид экстракционной кривой представлен на рис. 1б. В результате анализа строится экстракционная кривая по площади, под которой и определяется содержание водорода в образце по градуировочной кривой.

Данная градуировочная зависимость описывается уравнением:

$$y = 27,47x - 0,13. \quad (4)$$

Погрешность аппроксимирующей линейной зависимости оценивалась по формуле:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 = 0,02. \quad (5)$$

Стоит отметить, что градуировка по разработанным образцам может позволить измерять концентрации от 0,5 до 4,0 масс.% водорода.

В качестве оценки достоверности полученной градуировочной зависимости был проведен анализ водорода до и после калибровки в стехиометрическом гидриде циркония ZrH_2 с известной концентрацией водорода 2 масс.%. Гидрид циркония для верификации калибровки приобретался в компании Sigma-Aldrich (США), указанные стехиометрический состав и концентрация водорода были подтверждены

Таблица 4. Результаты определения погрешности в зависимости от определения концентрации водорода в полученных стандартных образцах

Table 4. The results of determining the error depending on the determination of the hydrogen concentration in the obtained reference materials

Серия	СКО среднего арифметического, масс.%	Доверительные границы случайной погрешности, масс.%	Доверительные границы НСП, масс.%	Суммарное СКО оценки измеряемой величины, масс.%	Доверительные границы погрешности при доверительной вероятности $P=0,95$, масс.%
1	0,005	0,010	0,032	0,019	0,035
2	0,008	0,016	0,053	0,032	0,057
3	0,008	0,017	0,056	0,033	0,060
4	0,011	0,024	0,078	0,046	0,084
5	0,013	0,028	0,093	0,055	0,100
6	0,012	0,026	0,200	0,116	0,205

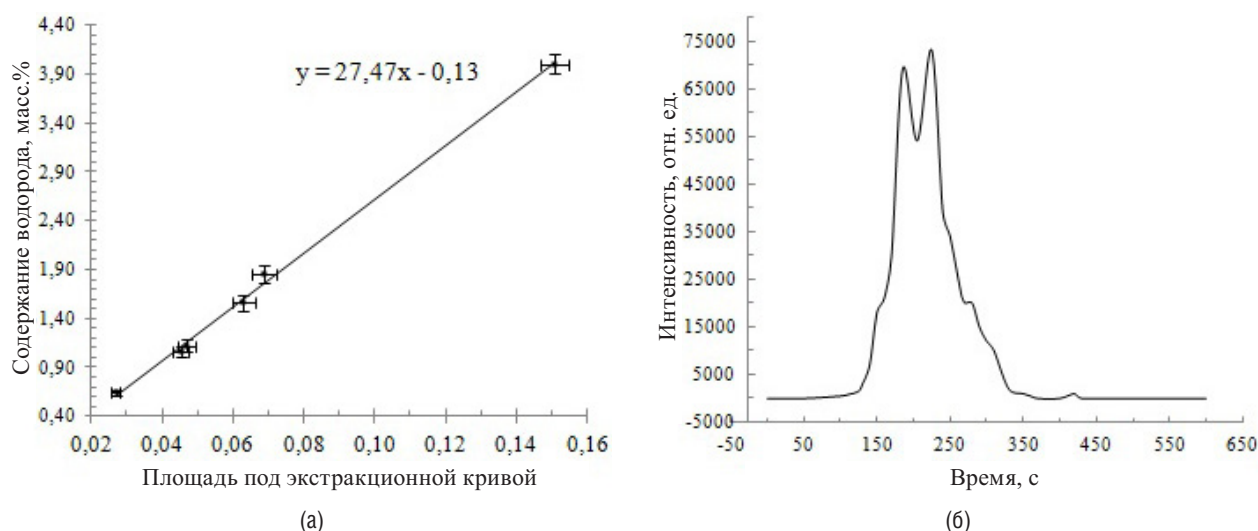


Рис. 1. Градуировочная зависимость разработанных образцов (а) и типичный вид экстракционной кривой (б)
Fig. 1. The calibration dependence of the developed samples (a) and the typical form of the extraction curve (б)

методами рентгеноструктурного анализа и элементного анализа. Результаты десяти измерений до калибровки содержания водорода в стехиометрическом гидриде циркония лежали в диапазоне от 1,7 до 2,2 масс.% водорода. Такая высокая погрешность измерений связана как раз с отсутствием градуировки для высоких содержаний водорода. На рис. 2 представлена градуировочная зависимость с измеренным гидридом циркония:

Как видно из рис. 2, полученное значение концентрации водорода в циркониевом сплаве попадает в доверительный интервал полученной градуировочной прямой. Полученное значение концентрации водорода

в циркониевом сплаве попадает в доверительный интервал полученной градуировочной прямой $\pm 10\%$. Результаты десяти измерений после калибровки содержания водорода в стехиометрическом гидриде циркония лежали в диапазоне от 1,98 до 2,02 масс.% водорода. Это подтверждает корректность полученной градуировочной прямой.

Закключение

В водородной энергетике при разработке материалов-накопителей водорода необходимо определять содержание водорода в материалах с высокой концентрацией. Одним из методов, позволяющих определять содержание водорода, является метод экстракции в среде инертного газа. Установки, реализующие данный метод, подвергаются градуировке по стандартным образцам с построением градуировочной зависимости. В данной работе для увеличения точности определения водорода для высоких концентраций на примере анализатора водорода модели RHEN602 фирмы LECO были разработаны стандартные образцы с высокой концентрацией водорода, а также подобраны оптимальные параметры анализа для исключения превышения порога чувствительности термокондуктометрической ячейки анализатора.

В результате были подготовлены серии стандартных образцов из проволоки титанового сплава ВТ1–0 высотой 3 мм и диаметром 2,5 мм с известной концентрацией водорода до $(1,860 \pm 0,010)$ масс.%. Для изготовления градуировочных образцов с высокой концентрацией до $(4,0 \pm 0,2)$ масс.% использовался технически чистый порошок титана. Подобраны оптимальные

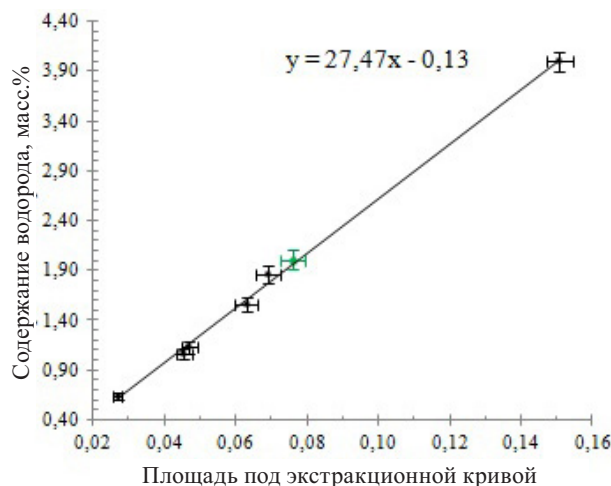


Рис. 2. Оценка достоверности градуировочной зависимости с измеренным гидридом циркония

Fig. 2. The assessment of the reliability of the calibration dependence with the measured zirconium hydride

параметры для измерения высоких концентраций водорода: время нагрева и выдержки составило 15 и 20 секунд соответственно, оптимальный шаг тока нагрева печи 60 А, что соответствует 100 °С.

Затем была проведена градуировка анализатора с построением градуировочной зависимости. Установлено, что градуировка по разработанным образцам может позволить проводить анализ материалов с содержанием водорода от 0,5 до 4,0 масс. %.

Надежность оценивалась с использованием стехиометрического гидрида циркония. При измерении образцов полученные данные помещались в доверительный интервал 10 %.

На основании представленных результатов можно сделать вывод, что разработанные стандартные образцы соответствуют заявленной цели и могут быть применены для проведения градуировки анализаторов водорода, работающих по принципу плавления в среде инертного газа, при высокой концентрации водорода.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта № FSWW-2020–0017.

Acknowledgments: The work was sponsored by the State Assignment «Science», research project No. FSWW-2020–0017.

Вклад соавторов: Спиридонова А. А. – измерения образцов на анализаторе водорода, анализ результатов, подготовку статьи; Кудияров В. Н. – подготовка образцов с различным содержанием водорода, участие в обсуждении результатов и подготовка статьи; Лидер А. М. – руководство работой, анализ полученных данных, формулировка результатов, редактирование статьи.

Authors' contribution: Spiridonova A. A. – performing measurements of samples on a hydrogen analyzer, analysis of the results, preparation of the article; Kudiarov V. N. – preparation of samples with different hydrogen content, participation in the discussion of the results and preparation of the article; Lider A. M. – work management, analysis of the obtained data, preparation of the results, revision of the article.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare no conflicts of interests.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Borzenko V., Eronin A. The use of air as heating agent in hydrogen metal hydride storage coupled with PEM fuel cell // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, № 48. P. 23120–23124. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.067>
2. Optimized operation combining costs, efficiency and lifetime of a hybrid renewable energy system with energy storage by battery and hydrogen in grid-connected applications / P. García-Triviño [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, № 48. P. 23132–23144 p. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.140>
3. Ortiz A. L., Zaragoza M. J. M., Collins-Martínez V. Hydrogen production research in Mexico: A review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, № 48. P. 23363–23379. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.004>
4. A DFT study of hydrogen storage on surface (110) of Mg 1–x Al x (0 ≤ x ≤ 0.1) / G. Ramírez-Dámaso [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, № 48. P. 23388–23393. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.202>
5. Liu W., Aguey-Zinsou K. F. Hydrogen storage properties of in-situ stabilised magnesium nanoparticles generated by electroless reduction with alkali metals // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40, № 47. P. 16948–16960. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.020>
6. Synthesis and properties of ZnO-HMD@ ZnO-Fe/Cu core-shell as advanced material for hydrogen storage / N. Bouazizi [et al.] // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2017. Vol. 491 P. 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.12.024>
7. The new metal complex templated polyoxoborate (s)(POB (s)) structures. Synthesis, structural characterization, and hydrogen storage capacities / D. A. Köse [et al.] // *Journal of Molecular Structure*. 2017. Vol. 1134. P. 806–813. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.01.010>
8. Колачев Б. А., Шалин Р. Е., Ильин А. А. Сплавы-накопители водорода : Справочник. М. : Металлургия, 1995. 384 с.
9. Hydrogenation thermokinetics and activation behavior of non-stoichiometric Zr-based Laves alloys with enhanced hydrogen storage capacity / Y. Zhang [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 694. P. 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.021>
10. Hydriding and dehydriding in air-exposed Mg Fe powder mixtures / K. Suárez-Alcántara [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, № 48. P. 23380–23387. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.242>
11. Hydrogen storage properties of a Mg-La-Fe-H nano-composite prepared through reactive ball milling / X. Chen [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 701. P. 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.056>
12. Hydrogen storage and hydrogen generation properties of CaMg 2-based alloys / M. Ma [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 691. P. 929–935. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.307>
13. Mg–M–LiH alloys prepared by mechanical milling and their hydrogen storage characteristics / K. Suárez-Alcántara [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40, № 48. P. 17344–17353. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.083>

14. Metal aluminum amides for hydrogen storage—Crystal structure studies / S. Hino [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40, № 47. P. 16938–16947. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.05.012>
15. Tarasov B. P., Lototsky M. V., Yartys V. A. Problem of hydrogen storage and prospective uses of hydrides for hydrogen accumulation // *Russian Chemical Journal*. 2006. Vol. 50, № 6. P. 34–48. <https://doi.org/10.1134/S1070363207040329>
16. Kulik O. P., Chernyshev L. I. Hydrogen energy: storage and transportation of hydrogen (review). Preprint of NAS of Ukraine, Institute of Problems of Materials Science. I. N. Frantsevich. P. 67.
17. Pundt A., Kirchheim R. Hydrogen in metals: microstructural aspects // *Annual Review of Materials Research*. 2006. Vol. 36, № 1. P. 555–608. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.36.090804.094451>
18. A critical review of mg-based hydrogen storage materials processed by equal channel angular pressing / L. Wang [et al.] // *Metals*. 2017. Vol. 7, № 9. P. 324. <https://doi.org/10.3390/met7090324>
19. da Silva Dupim I., Ferreira Santos S., Huot J. Effect of cold rolling on the hydrogen desorption behavior of binary metal hydride powders under microwave irradiation // *Metals*. 2015. Vol. 5, № 4. P. 2021–2033. <https://doi.org/10.3390/met5042021>
20. Гидриды интерметаллических соединений и сплавов, их свойства и применение в атомной технике / А. Н. Перевезенцев [и др.] // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 1988. Т. 19, № 6. С. 1386–1439.
21. Материалы для хранения водорода: анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках / В. М. Ажаж [и др.] // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. 2006. № 1. С. 145–152.
22. Microstructure and hydrogen storage properties of MgH₂–TiB₂–SiC composites / I. Milanović [et al.] // *Ceramics International*. 2013. Vol. 39, № 4. P. 4399–4405. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.11.029>
23. Fernandez A., Deprez E., Friedrichs O. A comparative study of the role of additive in the MgH₂ vs. the LiBH₄–MgH₂ hydrogen storage system // *International journal of hydrogen energy*. 2011. Vol. 36, № 6. P. 3932–3940. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.112>
24. Influence of particle size on electrochemical and gas-phase hydrogen storage in nanocrystalline Mg / O. Friedrichs [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. Vol. 463, № 1. P. 539–545. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.09.085>
25. Realistic simulation in a single stage hydrogen compressor based on AB₂ alloys / F. Leardini [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, № 23. P. 9780–9788. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.01.125>
26. Development of vanadium based hydrogen storage material: a review / S. Kumar [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 72. P. 791–800. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.063>
27. Nanotechnology in Mg-based materials for hydrogen storage / H. Shao [et al.] // *Nano Energy*. 2012. Vol. 1, № 4. P. 590–601. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2012.05.005>
28. Hydrogen absorption behavior of Zr-based getter materials with Pd Ag coating against gaseous impurities / T. Zhang [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, № 33. P. 14778–14787. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.073>
29. Tarnawski Z., Kim-Ngan N. T. H. Hydrogen storage characteristics of Ti- and V-based thin films // *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2016. Vol. 1, № 2. P. 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2016.05.003>
30. Проценко О. М., Карачевцев Ф. Н., Механик Е. А. Опыт разработки методики измерения содержания водорода в титановых сплавах // *Труды ВИАМ*. 2014. № 12. С. 1–5. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-12-8-8>
31. Grigorovich K. V. New possibilities of modern methods for determination of gas-forming impurities in metals // *Inorganic Materials*. 2007. Vol. 73, № 1. P. 23–34. <https://doi.org/10.1134/S0020168508140094>
32. Hydrogen desorption from pure titanium with different concentration levels of hydrogen / Y. Furuya [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2007. Vol. 446. P. 447–450. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.04.304>
33. Hydrogen absorption and desorption in a duplex-annealed Ti-6Al-4V alloy during exposure to different hydrogen-containing environments / D. Eliezer [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 433, № 1. P. 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.088>
34. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D., Abramov E. Thermal desorption spectroscopy (TDS) –Application in quantitative study of hydrogen evolution and trapping in crystalline and non-crystalline materials // *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*. 2007. Vol. 445. P. 625–631. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.089>
35. Von Zeppelin F., Haluška M., Hirscher M. Thermal desorption spectroscopy as a quantitative tool to determine the hydrogen content in solids // *Thermochimica Acta*. 2003. Vol. 404, № 1. P. 251–258. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00183-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00183-7)
36. Hydride dissociation and hydrogen evolution behavior of electrochemically charged pure titanium / A. Takasaki [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 1995. Vol. 224, № 2. P. 269–273. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(95\)01565-5](https://doi.org/10.1016/0925-8388(95)01565-5)
37. Titanium defect structure change after gas-phase hydrogenation at different temperatures and cooling rates / A. A. Mikhaylov [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1783. P. 020152. <https://doi.org/10.1063/1.4966445>
38. The role of surface oxides on hydrogen sorption kinetics in titanium thin films / E. Hadjixenophontos [et al.] // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 441. P. 324–330. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.044>
39. Hydrogenation-induced microstructure changes in titanium / R. S. Laptev [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 645. P. 193–195. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.257>
40. Effect of hydrogen on the structural and phase state and defect structure of titanium alloy / E. N. Stepanova [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1772. P. 030016. <https://doi.org/10.1063/1.4964554>
41. Sakintuna B., Lamari-Darkrim F., Hirscher M. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007. Vol. 32. P. 1121–1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>

42. Larionov V. V., Lider A. M., Laptev R. S. Control of changes in the defect structure of titanium saturated with hydrogen // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 135, № 1. P. 012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/135/1/012025>
43. Study of the structural, thermodynamic and cyclic effects of vanadium and titanium substitution in laves-phase AB₂ hydrogen storage alloys / U. Ulmer [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, № 31. P. 20103–20110. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.137>
44. Macin V., Christ H. J. Influence of hydride-induced microstructure modification on mechanical properties of metastable beta titanium alloy Ti 10V-2Fe-3Al // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40, № 47. P. 16878–16891. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>
45. Terminal solid solubility determinations in the H–Ti system / P. Vizcaino [et. al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40, № 47. P. 16928–16937. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.167>
46. Кудияров В. Н., Лидер А. М. Изучение процессов сорбции и десорбции водорода при помощи автоматизированного комплекса GAS REACTION CONTROLLER LP // Фундаментальные исследования. 2013. № 10–15. С. 3466–3471.

REFERENCES

1. Borzenko V., Eronin A. The use of air as heating agent in hydrogen metal hydride storage coupled with PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(48):23120–23124. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.067>
2. García-Triviño P., Fernández-Ramírez L. M., Gil-Mena A. J., Llorens-Iborra F., García-Vázquez C. A., Jurado Fr. Optimized operation combining costs, efficiency and lifetime of a hybrid renewable energy system with energy storage by battery and hydrogen in grid-connected applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(48):23132–23144 p. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.140>
3. Ortiz A. L., Zaragoza M. J. M., Collins-Martínez V. Hydrogen production research in Mexico: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(48):23363–23379. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.004>
4. Ramírez-Dámaso G., Ramírez-Platón I. E., López-Chávez E., Castillo-Alvarado F. L., Cruz-Torres A., Caballero F. et al. A DFT study of hydrogen storage on surface (110) of Mg 1– x Al x (0 ≤ x ≤ 0.1). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(48):23388–23393. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.202>
5. Liu W., Aguey-Zinsou K. F. Hydrogen storage properties of in-situ stabilised magnesium nanoparticles generated by electroless reduction with alkali metals. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(47):16948–16960. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.020>
6. Bouazizi N., Boudharaa T., Bargougui R., Vieillard J., Ammar S., Le Derf F. et al. Synthesis and properties of ZnO-HMD@ ZnO-Fe/Cu core-shell as advanced material for hydrogen storage. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2017;491:89–97. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.12.024>
7. Köse D. A., Yurdakul Ö., Şahin O., Öztürk Z. The new metal complex templated polyoxoborate (s)(POB (s)) structures. Synthesis, structural characterization, and hydrogen storage capacities. *Journal of Molecular Structure*. 2017;1134:806–813. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.01.010>
8. Kolachev B. A., Shalin R. E., Ilyin A. A. Hydrogen storage alloys: A Handbook. Moscow: Metallurgy; 1995. 384 p.
9. Zhang Y., Li J., Zhang T., Wu T., Kou H., Xue X. Hydrogenation thermokinetics and activation behavior of non-stoichiometric Zr-based Laves alloys with enhanced hydrogen storage capacity. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;694:300–308. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.021>
10. Suárez-Alcántara K., Palacios-Lazcano A. F., Funatsu T., Cabañas-Moreno J. G. Hydriding and dehydriding in air-exposed Mg Fe powder mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(48):23380–23387. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.242>
11. Chen X., Zou J., Zenga X., Ding W. Hydrogen storage properties of a Mg-La-Fe-H nano-composite prepared through reactive ball milling. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;701:208–214. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.056>
12. Ma M., Duan R., Ouyang L., Zhu X., Chen Zh., Peng Ch. Hydrogen storage and hydrogen generation properties of CaMg 2-based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;691:929–935. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.307>
13. Suárez-Alcántara K., Palacios-Lazcano A. F., Funatsu T., Cabañas-Moreno J. G. Mg–M–LiH alloys prepared by mechanical milling and their hydrogen storage characteristics. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(48):17344–17353. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.083>
14. Hino S., Grove H., Ichikawa T., Kojima Yo., Sørby M. H., Hauback B. C. Metal aluminum amides for hydrogen storage—Crystal structure studies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(47):16938–16947. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.012>
15. Tarasov B. P., Lototsky M. V., Yartys V. A. Problem of hydrogen storage and prospective uses of hydrides for hydrogen accumulation. *Russian Chemical Journal*. 2006;50(6):34–48. <https://doi.org/10.1134/S1070363207040329>
16. Kulik O. P., Chernyshev L. I. Hydrogen energy: storage and transportation of hydrogen (review). Preprint of NAS of Ukraine, Institute of Problems of Materials Science. I. N. Frantsevich. P. 67.
17. Pundt A., Kirchheim R. Hydrogen in metals: microstructural aspects. *Annual Review of Materials Research*. 2006;36(1):555–608. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.36.090804.094451>
18. A critical review of mg-based hydrogen storage materials processed by equal channel angular pressing. *Metals*. 2017;7(9):324. <https://doi.org/10.3390/met7090324>

19. da Silva Dupim I., Ferreira Santos S., Huot J. Effect of cold rolling on the hydrogen desorption behavior of binary metal hydride powders under microwave irradiation. *Metals*. 2015;5(4):2021–2033. <https://doi.org/10.3390/met5042021>
20. Perevezentsev A. N., Andreev B. M., Kapyshev V. K., Rivkis L. A., Malek M. P., Bystritskii V. M. Hydrides of intermetallic compounds and alloys, their properties and applications in nuclear technology. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo iadra = Physics of elementary particles and the atomic nucleus*. 1988;19(6):1386–1439. (In Russ.).
21. Azhazh V. M. Materials for hydrogen storage: analysis of development trends based on data on information flows. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Vakuuum, chistye materialy, sverkhprovodniki*. 2006;1:145–152. (in Russ.).
22. Milanović I., Milošević S., Rašković-Lovre Ž., Novaković N., Vujasin R., Matović L. et al. Microstructure and hydrogen storage properties of MgH₂-TiB₂-SiC composites. *Ceramics International*. 2013;39(4):4399–4405. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.11.029>
23. Fernandez A., Deprez E., Friedrichs O. A comparative study of the role of additive in the MgH₂ vs. the LiBH₄-MgH₂ hydrogen storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(6):3932–3940. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.112>
24. Friedrichs O., Kolodziejczyk L., Sánchez-López J. C., Fernández A., Lyubenova L., Zander D. et al. Influence of particle size on electrochemical and gas-phase hydrogen storage in nanocrystalline Mg. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008;463(1):539–545. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.09.085>
25. Leardini F., Bodega J. L., Ares J. R., Fernández J. F. Realistic simulation in a single stage hydrogen compressor based on AB₂ alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(23):9780–9788. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.125>
26. Kumar S., Jain A., Ichikawa T., Kojima Y., Dey G. K. Development of vanadium based hydrogen storage material: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;72:791–800. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.063>
27. Shao H., Xin G., Zheng J., Li X., Akiba E. Nanotechnology in Mg-based materials for hydrogen storage. *Nano Energy*. 2012;1(4):590–601. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.05.005>
28. Zhang T., Zhang Y., Zhang Mi., Hu R., Kou H., Li J. et al. Hydrogen absorption behavior of Zr-based getter materials with Pd Ag coating against gaseous impurities. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(33):14778–14787. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.073>
29. Tarnawski Z., Kim-Ngan N. T. H. Hydrogen storage characteristics of Ti- and V-based thin films. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2016;1(2):141–146. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2016.05.003>
30. Protsenko O. M., Karachevtsev F. N., Mekhanik E. A. Experience on development of measurement procedure for determination of hydrogen content in titanium alloys. *Proceedings of VIAM*. 2014;12:1–5. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-12-8-8>
31. Grigorovich K. V. New possibilities of modern methods for determination of gas-forming impurities in metals. *Inorganic Materials*. 2007;73(1):23–34. <https://doi.org/10.1134/S0020168508140094>
32. Furuya Y., Takasaki A., Mizuno K., Yoshiie T. Hydrogen desorption from pure titanium with different concentration levels of hydrogen. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007; 446:447–450. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.04.304>
33. Eliezer D., Tal-Gutelmacher E., Cross C. E., Boellinghaus Th. Hydrogen absorption and desorption in a duplex-annealed Ti-6Al-4V alloy during exposure to different hydrogen-containing environments. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;433(1):298–304. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.088>
34. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D., Abramov E. Thermal desorption spectroscopy (TDS)—Application in quantitative study of hydrogen evolution and trapping in crystalline and non-crystalline materials. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*. 2007; 445:625–631. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.089>
35. Von Zeppelin F., Haluška M., Hirscher M. Thermal desorption spectroscopy as a quantitative tool to determine the hydrogen content in solids. *Thermochemica Acta*. 2003;404(1):251–258. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00183-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00183-7)
36. Takasaki A., Furuya Y., Ojima K., Taneda Y. Hydride dissociation and hydrogen evolution behavior of electrochemically charged pure titanium. *Journal of Alloys and Compounds*. 1995;224(2):269–273. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(95\)01565-5](https://doi.org/10.1016/0925-8388(95)01565-5)
37. Mikhaylov A. A., Laptev R. S., Kudiiarov V. N., Volokitinad T. L. Titanium defect structure change after gas-phase hydrogenation at different temperatures and cooling rates. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1783:020152. <https://doi.org/10.1063/1.4966445>
38. Hadjixenophontos E., Michalek L., Roussel M., Hirscher M., Schmitz G. The role of surface oxides on hydrogen sorption kinetics in titanium thin films. *Applied Surface Science*. 2018; 441:324–330. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.044>
39. Laptev R., Lider A., Bordulev Yu., Kudiiarov V., Garanin G. Hydrogenation-induced microstructure changes in titanium. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;645:193–195. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.257>
40. Stepanova E., Bordulev Y., Kudiiarov V., Laptev R., Lider A., Xinming J. Effect of hydrogen on the structural and phase state and defect structure of titanium alloy. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1772:030016. <https://doi.org/10.1063/1.4964554>
41. Sakintuna B., Lamari-Darkrim F., Hirscher M. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007;32:1121–1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>
42. Larionov V. V., Lider A. M., Laptev R. S. Control of changes in the defect structure of titanium saturated with hydrogen. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016;135(1):012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/135/1/012025>
43. Ulmer U., Dieterich M., Pohl A., Dittmeyer R., Linder M., Fichtner M. Study of the structural, thermodynamic and cyclic effects of vanadium and titanium substitution in laves-phase AB₂ hydrogen storage alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(31):20103–20110. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.137>

44. Macin V., Christ H. J. Influence of hydride-induced microstructure modification on mechanical properties of metastable beta titanium alloy Ti 10V-2Fe-3Al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(47):16878–16891. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>
45. Vizcaino P., Lopez Vergara I. A., Banchik A. D., Abriata J. P. Terminal solid solubility determinations in the H–Ti system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(47):16928–16937. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.167>
46. Kudiyarov V. N., Lider A. M. Investigation of hydrogen sorption and desorption processes with the help of automated complex GAS REACTION CONTROLLER LP. *Fundamental Research*. 2013;10–15:3466–3471. (In Russ.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ГОСТ Р 8.736-2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные понятия. = State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple direct measurements. Methods of measurement results processing. Main principles. Национальный стандарт РФ утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1045-ст. Разработан ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». М.: Стандартинформ, 2013. 22 с. Текст: непосредственный.

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: kudyarov@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0901-2409>

Лидер Андрей Маркович – д. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой – руководитель отделения на правах кафедры отделения экспериментальной физики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
e-mail: lider@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3868-2647>

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: kudyarov@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0901-2409>

Andrey M. Lider – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Experimental Physics, National Research Tomsk Polytechnic University. 30 Lenina ave., Tomsk, 634050, Russia
e-mail: lider@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3868-2647>