

НАНОМАТЕРИАЛЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 536.7, 661.965, 620.9

ЭФФЕКТИВНЫЕ ГИДРИДООБРАЗУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ LaNi₅ ДЛЯ СИСТЕМ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

© 2021 г. А. Н. Казаков^{1,*}, В. И. Борзенко¹, Д. О. Дуников^{1,2},
И. А. Романов¹, Д. В. Блинов^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, Россия

*E-mail: h2lab@mail.ru

Поступила в редакцию 10.06.2020 г.

После доработки 21.09.2020 г.

Принята к публикации 21.09.2020 г.

Переход от традиционных энергоносителей к возобновляемым, энерго- и ресурсосберегающим технологиям производства энергии поднимает ряд задач, среди которых одними из ключевых являются разработка и создание эффективных систем аккумулирования энергии. Одним из наиболее перспективных промежуточных энергоносителей является водород за счет высокой удельной теплоты сгорания и экологичности, однако существуют трудности в хранении. Гидридообразующие материалы (LaNi₅, TiFe, TiCr₂, Mg₂Ni и другие) обладают рядом преимуществ в качестве материалов для хранения водорода: высокая объемная плотность хранения, безопасность благодаря образованию гидридной твердой фазы, селективность поглощения водорода и др. Представлены результаты экспериментальных исследований новых гидридообразующих материалов на основе LaNi₅ и систем аккумулирования энергии на их основе.

DOI: 10.1134/S1992722321020084

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается устойчивый рост установленной мощности возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В 2019 г. установленная мощность ВИЭ выросла более чем на 200 ГВт. Ввод мощностей солнечной энергетики увеличился на 12% в 2019 г. до рекордных 115 ГВт. В ветроэнергетическом секторе рост мощностей составил 19% до 650 ГВт по всему миру [1]. Сокращение потребления традиционных углеводородных энергоносителей, разработка и внедрение энергосберегающих технологий, увеличение производства электроэнергии на основе ВИЭ способствуют улучшению экологической ситуации в мире, рациональному использованию энергетических ресурсов и децентрализации энергоснабжения.

Неравномерный характер режимов работы ветровых и солнечных энергоустановок требует создания систем аккумулирования энергии, которые будут удовлетворять нуждам потребителей в соответствии с необходимым графиком нагрузки. Одним из перспективных путей решения этой задачи является использование водородных систем аккумулирования [2–5], преимущество которых заключается в возможности длительного хранения энергии без потерь, что недостижимо

для химических источников тока, а также в высокой плотности хранения энергии и малых капитальных затратах по сравнению с гидро- и пневмоаккумулирующими системами. Водород производится электролизом воды за счет электроэнергии от ВИЭ, аккумулируется в системе хранения и используется для производства электроэнергии по необходимому потребителю графику в низкотемпературных топливных элементах или других энергоустановках (например, дизель-генераторах) [2, 6]. Еще одним перспективным направлением является производство водорода биологическими методами из доступного сырья местных ресурсов биомассы [7–9].

Среди разрабатываемых новых технологий очистки и хранения водорода для автономной энергетики экономически приемлемыми и безопасными могут стать устройства и системы, основанные на использовании обратимых металлгидридов (МГ) – интерметаллических соединений (ИМС), способных избирательно и обратимо поглощать водород [10, 11]. Избирательность поглощения водорода, возможность гибко контролировать термодинамические свойства интерметаллических сплавов с помощью вариации их состава позволяют использовать их не только для хранения, но и для высокоэффективной очистки

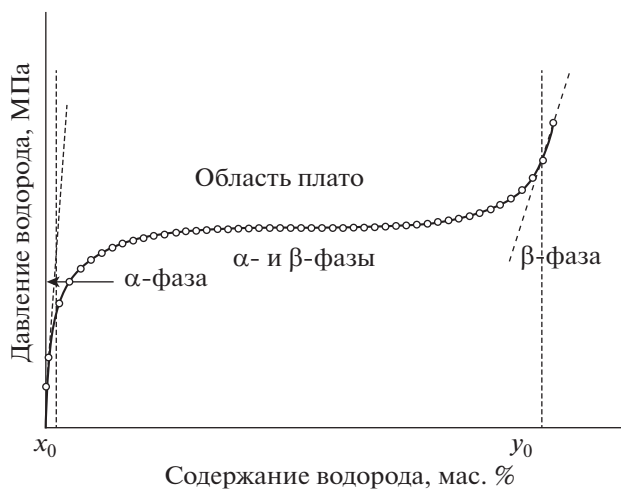
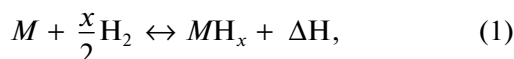


Рис. 1. Общий вид зависимости равновесного давления водорода от состава гидридной фазы.

водорода, создания термохимических тепловых насосов и водородных компрессоров.

Хранение водорода МГ основано на способности металлов и ИМС обратимо поглощать и хранить атомарный водород в межатомных пустотах кристаллической решетки. Реакцию водорода с металлом или ИМС можно схематически представить в виде уравнения



где M — металл/ИМС, H — водород.

Типичную изотерму реакции металла с водородом можно разделить на три области по мере роста давления водорода [12]: растворение водорода в металле (α -фаза); сосуществование насыщенного раствора водорода в металле и гидрида ($\alpha+\beta$ фазы); растворение водорода в гидриде (β -фаза) (рис. 1). В двухфазной области существует “плато” изотермы, где давление меняется незначительно, и в первом приближении можно считать, что поглощение или выделение водорода происходит при постоянных температуре и давлении. Это свойство удобно для практического применения в устройствах хранения водорода. Если давление на входе в МГ-реактор выше равновесного давления, соответствующего температуре водородпоглощающего материала, то водород будет абсорбироваться с выделением тепла, если ниже, то будет десорбироваться с поглощением тепла.

Обратимые гидриды ИМС являются перспективными материалами для аккумулирования водорода особенно в стационарных применениях в интеграции с топливными элементами, которые

можно представить общей формулой $A_m B_n \text{H}_x$, где A — металл, образующий стабильный бинарный гидрид (La , Ce , Mm , Ti , Zr , V , Mg), а металл B в обычных условиях с водородом не взаимодействует (обычно переходный металл, например Fe , Co , Ni , V , Mn , Cr и т.д.). В зависимости от стехиометрического соотношения металла A к металлу B выделяют несколько основных типов ИМС: AB_5 , AB_2 , $AB_{3-3.5}$, AB , A_2B , а также твердые растворы внедрения на основе Ti и V .

Наиболее перспективными ИМС являются сплавы AB_5 -типа благодаря ряду преимуществ: возможность варьирования рабочих характеристик в умеренных условиях при температурах 273–373 К и давлениях 0–1.0 МПа за счет изменения состава, легкость активации, устойчивость к небольшим количествам примесей водяного пара и кислорода в водороде, легкость восстановления свойств после отравления поверхности газами CO , H_2S [13].

Использование МГ-систем в хранении водорода, получаемого из ВИЭ (солнечная, ветровая и биоэнергетика), делает необходимыми разработку и исследование новых гидридообразующих ИМС с требуемыми равновесными давлениями, циклической стабильностью и устойчивостью к газовым примесям.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований новых гидридообразующих ИМС AB_5 -типа для систем очистки и хранения водорода и их использования в разработанных в ОИВТ РАН демонстрационных установках.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Серия лабораторных образцов AB_5 -типа на основе LaNi_5 с частичным замещением La на Ce , Ni на Fe , Mn , Al , Sn и другие металлы была приготовлена плавлением исходных стехиометрических навесок чистых металлов в электродуговой печи в аргонной атмосфере. Для достижения гомогенности состава каждый образец переплавляли не менее 3 раз. Чистота исходных металлов составляла не менее 99.5%.

Фазовый состав и параметры кристаллической решетки приготовленных ИМС определяли с помощью рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра D8 Advance (Bruker) с $\text{CuK}\alpha$ -излучением. Обработку дифрактограмм проводили в программных средах Jana2006 и Crystal Im-

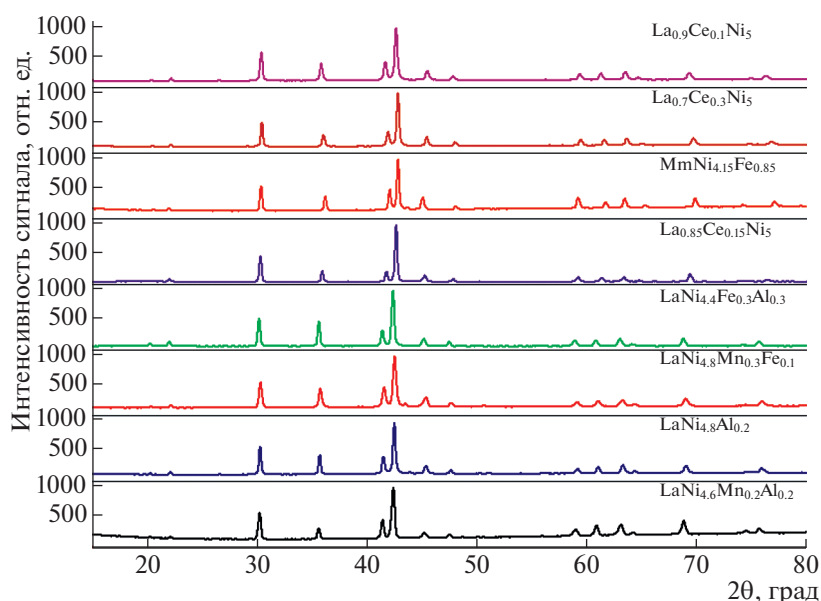


Рис. 2. Дифрактограммы образцов ИМС AB_5 -типа.

раст Match с использованием дифракционных баз данных JCPDS PDF-2.

Водородсорбционные свойства сплавов исследовали с помощью газовой РСТ (давление—концентрация—температура) установки типа Сиверта [14]. Корольки сплавов загружали в термостабилируемый реактор. Перед началом измерений все образцы были активированы в вакууме при 300°C в течение 60 мин. Затем выполнили активацию — три цикла полной абсорбции—десорбции, после которых проводили измерения. Сорбцию и десорбцию водорода проводили в интервале температур $295\text{--}333\text{ K}$ и давлений $0.001\text{--}5\text{ МПа}$.

Исследования перспективных композиций ИМС для учебно-демонстрационной установки “H2Віорower” и систем хранения водорода проводили на комплексном стенде 12-04 ОИВТ РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структурные и водородсорбционные свойства ИМС AB_5 -типа. Рентгенофазовый анализ показал высокую гомогенность всех исследуемых образцов (рис. 2). Полученные спектры хорошо описываются теоретически рассчитанными. Положения линий совпадают с расчетными и отсутствуют пики (интенсивность которых превышала бы интенсивность фона), принадлежащие другим фазам. Рентгенограммы подтверждают, что структуры полученных соединений принадлежат структурному типу CaCu_5 .

РСТ-изотермы десорбции водорода при комнатной температуре представлены на рис. 3. Частичное замещение Ni на Al, Mn, Fe значительно

снижает равновесное давление водорода по сравнению с исходным LaNi_5 . Большие атомы Al, Mn, Fe относительно атомов Ni увеличивают параметры кристаллической элементарной ячейки, что приводит к увеличению межатомных пустот в кристаллической структуре. Наибольшая обратимая емкость 1.2 мас. \% H_2 измерена для $\text{LaNi}_{4.8}\text{Al}_{0.2}$, но давление равновесия водорода слишком высокое для использования при очистке водорода, получаемого биологическим путем. Сплавы $\text{LaNi}_{4.8}\text{Fe}_{0.3}\text{Mn}_{0.1}$ и $\text{LaNi}_{4.4}\text{Fe}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ демонстрируют необходимые свойства в условиях окружающей среды.

С другой стороны, частичное замещение La на Ce или использование смеси редкоземельных металлов (мишметалл Mm) увеличивает равновесное давление водорода. Этот эффект появляется из-за уменьшения объема кристаллической ячейки для Ce-замещенных сплавов. Особое поведение сплавов, замещенных Ce, связывают с промежуточным валентным состоянием Ce (Ce^{3+} , Ce^{4+}) [15]. Сплавы $\text{La}_{0.9}\text{Ce}_{0.1}\text{Ni}_5$ и $\text{La}_{0.85}\text{Ce}_{0.15}\text{Ni}_5$ обладают подходящими равновесными давлениями и емкостями по водороду для использования в системах длительного хранения водорода, получаемого путем электролиза с использованием энергии ВИЭ.

Водородсорбционные и термодинамические свойства исследованных образцов приведены в табл. 1. Образцы ИМС с низкими равновесными давлениями обладают высокой стабильностью гидридов, что увеличивает циклическую стабильность при их использовании в системах очистки водорода. Для образцов с высокими равновесны-

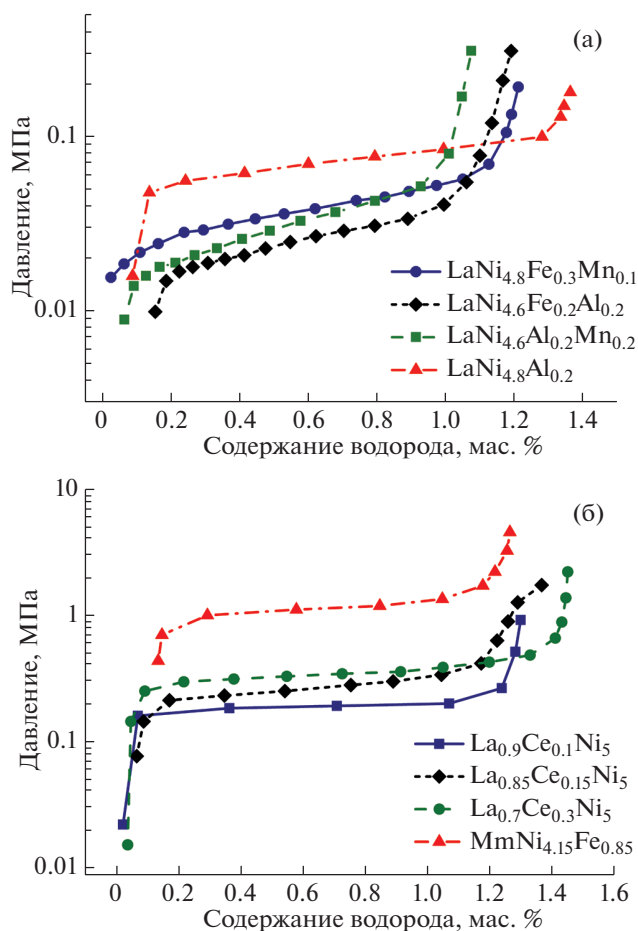


Рис. 3. PCT-изотермы десорбции водорода ИМС AB_5 -типа при 295 К: низкие (а) и высокие (б) равновесные давления.

ми давлениями характерны более высокие обратимые емкости по водороду, что позволит оптимизировать массогабаритные характеристики систем хранения водорода.

В активированном состоянии МГ-сплавы превращаются в мелкодисперсный порошок. Типичное распределение частиц по размерам и изображение активированного порошка, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), представлены на рис. 4. Характерный размер частиц 10–30 мкм, что снижает эффективную теплопроводность МГ-засыпок и тем самым ухудшает теплоперенос в объеме реакторов хранения [16]. Интенсификацию теплопереноса достигали добавлением охлаждающих контуров [17–19], пеноматериалов с высокой теплопроводностью [20–22], созданием композитных компактов с углеродными материалами [23–25]. Разработка оптимальных конструкций МГ-реакторов для практического применения является очень сложной из-за широкого выбора материалов, различной геометрии реактора, площади поверхности теплообмена и степени интенсификации теплопереноса. Все указанные выше параметры должны быть оптимизированы в соответствии требованиями для МГ-системы, включая общую массу системы и рабочие условия.

Разработка металлгидридных систем очистки и хранения водорода. Разделение и очистка водорода с использованием МГ основаны на их способности к высокоселективному поглощению водорода из различных газовых смесей. МГ-технология разделения водорода может быть перспективным решением для малых энергоустановок на основе водорода, получаемого биологическим путем. Малые потоки газов, низкие давление и содержание водорода делают неприменимыми методы короткоциклового адсорбции [26, 27], криогенной дистилляции, мембранных технологий [28–33]. Тогда как МГ-технологии позволяют извлекать водород из различных газовых смесей (аммиачные смеси, риформинговый газ, биогаз) с высокой эффективностью [17, 34–37].

Таблица 1. Водородсорбционные и термодинамические свойства сплавов AB_5 -типа

Состав ИМС	$P_{\text{дес}}$ 295 К, МПа	$C_{\text{обр}}$ 295, мас. % H_2	$\Delta H_{\text{дес}}$, кДж/моль	$\Delta S_{\text{дес}}$, Дж/(моль К)
Сплавы с низким равновесным давлением				
$LaNi_{4.8}Fe_{0.3}Mn_{0.1}$	0.049	1.0	–36.8	119.7
$LaNi_{4.6}Al_{0.2}Mn_{0.2}$	0.033	0.9	–35.0	107.2
$LaNi_{4.8}Al_{0.2}$	0.074	1.2	–35.5	116.9
$LaNi_{4.4}Fe_{0.3}Al_{0.3}$	0.024	1.1	–36.1	110.4
Сплавы с высоким равновесным давлением				
$La_{0.9}Ce_{0.1}Ni_5$	0.19	1.1	–31.2	112.1
$La_{0.85}Ce_{0.15}Ni_5$	0.27	1.15	–33.2	121.6
$La_{0.7}Ce_{0.3}Ni_5$	0.36	1.3	–33.1	123.0
$La_{0.36}Ce_{0.64}Ni_{4.15}Fe_{0.85}$	1.18	1.1	–28.3	115.8

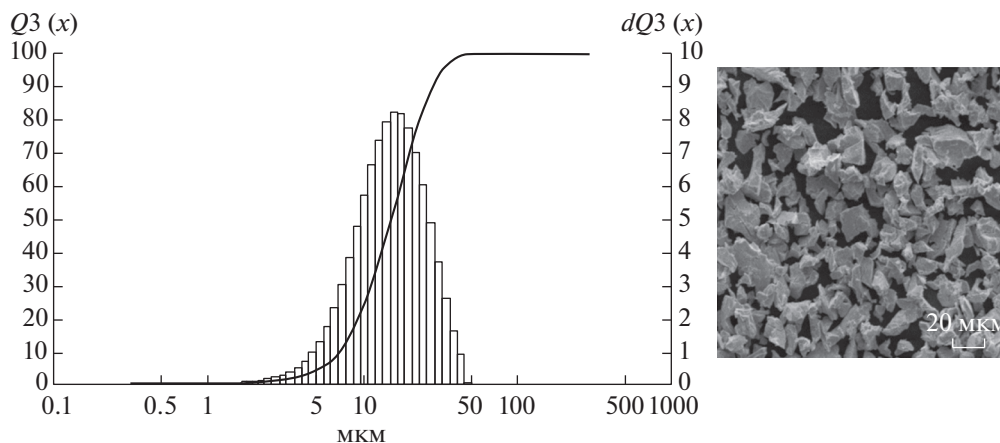


Рис. 4. Распределение частиц по размерам и СЭМ-изображение активированного металлогидридного порошка.

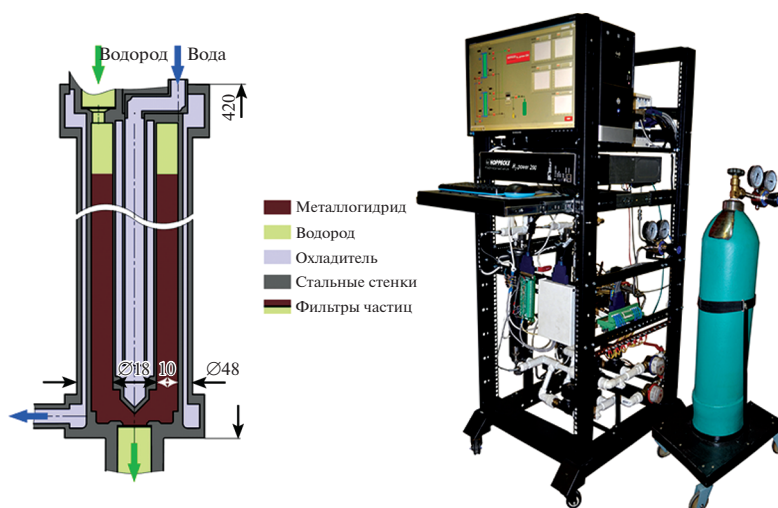


Рис. 5. Схема проточного реактора PXO-8 и пилотная установка “H2Biopower”.

Для разделения и очистки водорода была разработана конструкция проточного МГ-реактора с двумя теплообменными контурами, которая показала свою эффективность [38]. Сплавы $\text{LaNi}_{4.8}\text{Fe}_{0.3}\text{Mn}_{0.1}$ и $\text{LaNi}_{4.4}\text{Fe}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ были отобраны для дальнейших исследований по очистке водорода из различных водородных смесей в реакторах проточного типа PXO-8 с номинальной емкостью 110 нл H_2 , которые вмонтированы в демонстрационную энергоустановку “H2Biopower” (рис. 5). При разделении газовой смеси водород-диоксид углерода (40: 60%) моделирующего состава биоводорода эффективность извлечения водорода сплавом $\text{LaNi}_{4.8}\text{Fe}_{0.3}\text{Mn}_{0.1}$ достигает свыше 80% при использовании практически всего полезного объема реактора при входном расходе газовой смеси 5 нл/мин (рис. 6). Эффективность разделения водород-метановых газовых смесей с объемной долей водорода не более 10% сплавом

$\text{LaNi}_{4.4}\text{Fe}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ достигает 70% при использовании 90% полезного объема реактора. Более высокие значения коэффициента извлечения водорода и использования полезного объема реактора для сплава $\text{LaNi}_{4.4}\text{Fe}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ достигнуты за счет оптимизации состава и увеличения проницаемости МГ-засыпки в реакторе.

Системы долговременного хранения водорода PX-1 (рис. 7) номинальным объемом 10 с использованием сплавов $\text{La}_{0.9}\text{Ce}_{0.1}\text{Ni}_5$ и $\text{La}_{0.85}\text{Ce}_{0.15}\text{Ni}_5$ отличаются эффективностью и безопасностью (рис. 8). Водородпоглощающие материалы могут обеспечить выходное давление водорода 0.15–0.2 МПа при комнатных условиях, достаточное для работы топливных элементов с твердополимерными мембранами. Данные системы могут быть перспективны в качестве резервных источников энергии. Повышение выходного давления до 0.9–1.1 МПа достигается ис-

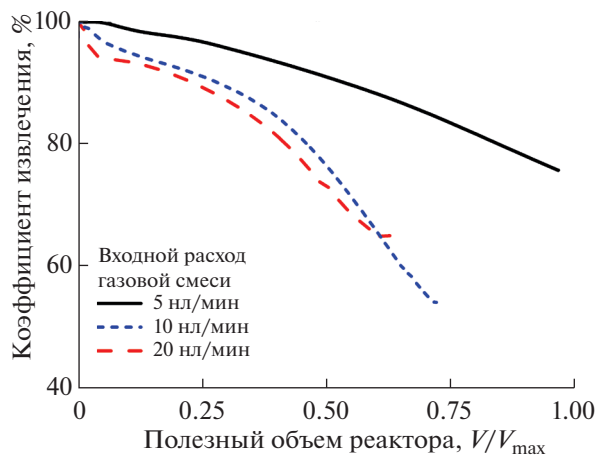


Рис. 6. Эффективность разделения водорода сплавом $LaNi_{4.8}Fe_{0.3}Mn_{0.1}$ в реакторе РХО-8.

пользованием в качестве теплоносителя горячей воды.

ВЫВОДЫ

Системы хранения водорода на основе обратимых металлогидридных материалов демонстрируют свою перспективность для интеграции с быстро растущими технологиями производства возобновляемой энергии. Интерметаллические соединения AB_5 -типа обладают такими преимуществами, как легкая активация, стойкость к примесным газам, высокая объемная плотность водорода в твердофазном состоянии и разнообразие составов для удовлетворения требований для практического применения в различных областях.

Структурные, водородсорбционные и термодинамические свойства новых интерметаллических соединений на основе $LaNi_5$, замещенного Ce, Al, Mn, Fe, исследованы для определения перспективных композиций. Обратимые водо-

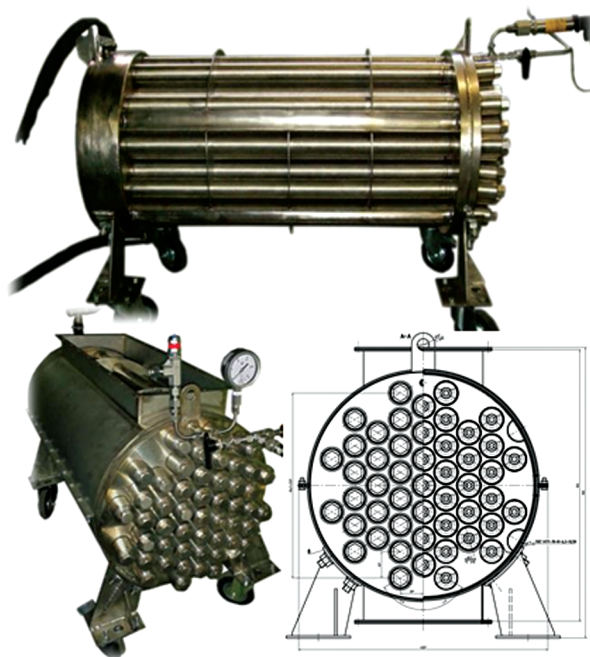


Рис. 7. Система хранения водорода РХ-1 и РСТ-изотерма сплава $La_{0.9}Ce_{0.1}Ni_5$.

родные емкости достигают 1.1–1.3 мас. %, а равновесные давления водорода находятся в широком диапазоне от 0.02 до 1.18 МПа для исследуемых сплавов. Ряд сплавов $LaNi_{4.8}Fe_{0.3}Mn_{0.1}$, $LaNi_{4.4}Fe_{0.3}Al_{0.3}$, $La_{0.9}Ce_{0.1}Ni_5$ и $La_{0.85}Ce_{0.15}Ni_5$ масштабирован для применения в пилотных энергоустановках и системах хранения водорода с общей загрузкой водородпоглощающего материала от 1 до 80 кг.

Эффективность очистки водорода сплавами низкого давления в проточном реакторе РХО-8 достигает 70–80% для различных водородсодержащих газовых смесей.

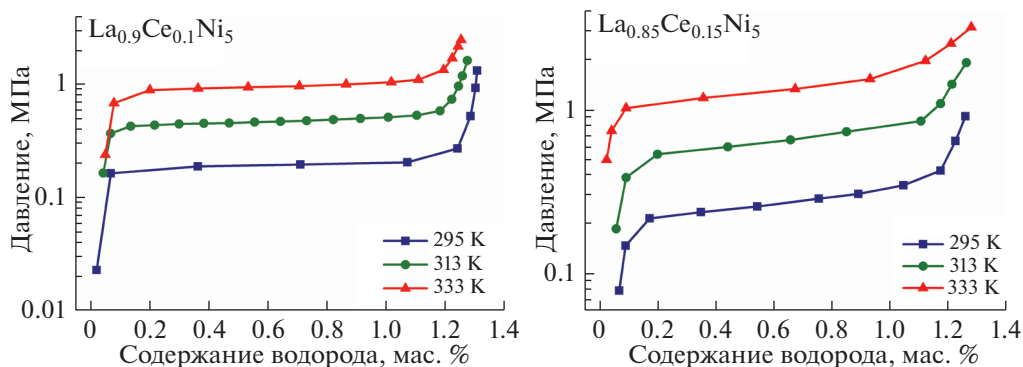


Рис. 8. Система хранения водорода РХ-1.

Сплавы высокого давления $\text{La}_{0.9}\text{Ce}_{0.1}\text{Ni}_5$ и $\text{La}_{0.85}\text{Ce}_{0.15}\text{Ni}_5$, применяемые в системах хранения PX-1 , при нормальных условиях могут обеспечить долговременное хранение водорода в безопасном твердофазном состоянии до $10 \text{ нм}^3 \text{ H}_2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- REN21, RENEWABLES 2020 Global Status Report. Paris. 2020.
- Zoulias E.I., Lymberopoulos N. // Hydrogen-based autonomous power systems: techno-economic analysis of the integration of hydrogen in autonomous power systems. Springer, 2008.
- Hydrogen and Fuel Cells: Fundamentals, Technologies and Applications. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH. 2010. 877.
- Мальшиенко С.П. // Российский химический журнал. 2005. Т. XLI. С. 112.
- да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 704 с.
- Tzamalis G., Zoulias E.I., Stamatakis E. et al. // Renewable Energy. 2011. V. 36 (1). P. 118. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.006>
- Kim D.-H., Kim S.-H., Kim K.-Y., Shin H.-S. // Int. J. Hydrogen Energy. 2010. V. 35 (4). P. 1590. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.041>
- La Licata B., Sagnelli F., Boulanger A. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2011. V. 36 (13). P. 7861. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.096>
- Morra S., Arizzi M., Allegra P. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2014. V. 39 (17). P. 9018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.009>
- Мальшиенко С.П., Назарова О.В. // Аккумуляция водорода. Атомно-водородная энергетика и технология. 1988. Вып. 8. С. 155.
- Verbetsky V.N., Malyschenko S.P., Mitrokhin S.V. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 1998. V. 23 (12). P. 1165. [https://doi.org/10.1016/s0360-3199\(98\)00006-8](https://doi.org/10.1016/s0360-3199(98)00006-8)
- Колачев Б.А., Шалин Р.Е., Ильин А.А. Сплавы-накопители водорода. М.: Металлургия, 1995. 384 с.
- Sandrock G. // J. Alloys Compd. 1999. V. 293–295. P. 877. [https://doi.org/10.1016/s0925-8388\(99\)00384-9](https://doi.org/10.1016/s0925-8388(99)00384-9)
- Malyschenko S.P., Mitrokhin S.V., Romanov I.A. // J. Alloys Compd. 2015. V. 645. Suppl. 1. P. S84. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.273>
- Senoh H., Takeichi N., Takeshita H.T. et al. // Mater. Sci. Eng. B. 2004. V. 108 (1–2). P. 96. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2003.10.055>
- Borzenko V., Dunikov D., Malyschenko S. // High Temp. 2011. V. 49 (2). P. 249. <https://doi.org/10.1134/s0018151x11010019>
- Dunikov D., Borzenko V., Blinov D. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41 (46). P. 21787. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.190>
- Malyschenko S.P., Borzenko V.I., Dunikov D.O., Nazarova O.V. // Therm. Eng. 2012. V. 59 (6). P. 468. <https://doi.org/10.1134/S0040601512060055>
- Dunikov D., Borzenko V., Malyschenko S. // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37. P. 13843. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.078>
- Supper W., Groll M., Mayer U. // J. Less-Common Met. 1984. V. 104 (2). P. 279. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(84\)90412-0](https://doi.org/10.1016/0022-5088(84)90412-0)
- Groll M. // Heat Recovery Systems CHP. 1993. V. 13 (4). P. 341. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(93\)90059-5](https://doi.org/10.1016/0890-4332(93)90059-5)
- Isselhorst A., Groll M. // J. Alloys Compd. 1995. V. 231 (1–2). P. 888. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(95\)01777-1](https://doi.org/10.1016/0925-8388(95)01777-1)
- Ron M., Gruen D., Mendelsohn M., Sheet I. // J. Less-Common Met. 1980. V. 74 (2). P. 445. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(80\)90183-6](https://doi.org/10.1016/0022-5088(80)90183-6)
- Klein H.-P., Groll M. // Int. J. Hydrogen Energy. 2004. V. 29 (14). P. 1503. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.017>
- Rodríguez Sánchez A., Klein H.-P., Groll M. // Int. J. Hydrogen Energy. 2003. V. 28 (5). P. 515. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00057-5)
- Zhu X., Shi Y., Li S., Cai N. // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43 (29). P. 13305. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.030>
- Delgado J.A., Águeda V.I., Uguina M.A. et al. // Chem. Eng. J. 2017. V. 326. P. 117. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.144>
- Mohamad I.N., Rohani R., Mastar M.S. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41 (7). P. 4474. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.08.002>
- Bernardo P., Jansen J.C. // Compendium of Hydrogen Energy. Oxford: Woodhead Publishing, 2015. P. 419. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-361-4.00014-5>
- Bakonyi P., Nemestóthy N., Bélafi-Bakó K. // Int. J. Hydrogen Energy. 2013. V. 38 (23). P. 9673. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.158>
- Koroglu E.O., Ozdemir O.K., Ozkaya B., Demir A. // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44 (32). P. 17297. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.291>
- Chesnokov V.V., Chichkan A.S., Parmon V.N. // Nanotechnologies in Russia. 2017. V. 12 (3). P. 165. <https://doi.org/10.1134/S1995078017020057>
- Volkov V.V., McHedlishvili B.V., Roldugin V.I. et al. // Nanotechnologies in Russia. 2008. V. 3 (11). P. 656. <https://doi.org/10.1134/S1995078008110025>
- Au M., Chen C., Ye Z. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 1996. V. 21 (1). P. 33. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(95\)00044-e](https://doi.org/10.1016/0360-3199(95)00044-e)
- Miura S., Fujisawa A., Tomekawa S. et al. // J. Alloys Compd. 2013. V. 580. Suppl. 1(0). P. S414. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.154>
- Miura S. // 19th World Hydrogen Energy Conference 2012.
- Dunikov D., Blinov D. // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. V. 45 (16). P. 9914. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.201>
- Blinov D.V., Borzenko V.I., Dunikov D.O., Kazakov A.N. // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1128. P. 012120. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1128/1/012120>