

ВОДОРОДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$

В.Б. Сон¹, Ю.Я. Шимкус¹, Б.П. Тарасов¹, Р.В. Денис², В.А. Яртысь²

¹Институт проблем химической физики РАН
142432 Черноголовка, Московская обл., пр. Акад. Семенова, д. 1
Тел./факс: 8(496) 522-17-43; e-mail: tarasov@icp.ac.ru

²Институт энергетических технологий
POB 40, N-2027, Kjeller, Норвегия

Заключение совета рецензентов: 01.11.15 Заключение совета экспертов: 05.11.15 Принято к публикации: 09.11.15

Для увеличения массового содержания водорода в интерметаллидах типа LaNi_3 предложено заменить часть La на Mg. Приготовлены сплавы состава $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$ ($x = 1, 1.1$ и 1.2). Для этого сначала электродуговой плавкой смесей высокочистых La и Ni в атмосфере аргона получали лантан-никелевые сплавы, которые измельчали в планетарной шаровой мельнице с добавкой необходимого количества порошка магния. Затем полученную однородную смесь спрессовывали в таблетки, заворачивали в танталовую фольгу, помещали в стальную трубу и проводили гомогенизационный отжиг при 950 °C на протяжении 6 ч. Приготовленные таким образом сплавы состояли из 70–80 мас.% фазы интерметаллида со структурным типом PuNi_3 и примесных фаз $\text{La}_4\text{MgNi}_{19}$ и LaNi_5 .

Изучены водородсорбционные свойства приготовленных интерметаллических соединений. Установлено, что на изотермах $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9 - \text{H}_2$ присутствует одно плато фазового перехода, что свидетельствует об образовании только одной гидридной фазы с содержанием водорода 1,58 мас.% (La_2MgNi_9), 1,52 мас.% ($\text{La}_{1.9}\text{Mg}_{1.1}\text{Ni}_9$) и 1,5 мас.% ($\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Ni}_9$). При этом при увеличении содержания магния в образце повышается равновесное давление. Рассчитаны изменения энтальпии при дегидрировании и обнаружено повышение теплового эффекта реакции с увеличением содержания магния.

Ключевые слова: водород, магний, лантан, никель, интерметаллические соединения, гидридные фазы, хранение водорода, водородсорбционные свойства.

HYDROGEN SORPTION PROPERTIES OF INTERMETALLIC COMPOUNDS $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$

V.B. Son¹, Yu.Ya. Shimkus¹, B.P. Tarasov¹, R.V. Denis², V.A. Yartys²

¹Institute of Problems of Chemical Physics of RAS
1 Acad. Semenov ave., Chernogolovka, Moscow reg., 142432, Russia
Tel./fax: +7(496) 522-17-43; e-mail: tarasov@icp.ac.ru

²Institute for Energy Technology
POB 40, N-2027, Kjeller, Norway

Referred: 01.11.15 Expertise: 05.11.15 Accepted: 09.11.15

To increase the hydrogen mass in intermetallides of type LaNi_3 proposed to replace part of the La on Mg. Alloys of composition $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$ ($x = 1, 1.1$ and 1.2) were prepared. For this first lanthanum-nickel alloys were obtained by arc melting of mixtures of high purity La and Ni in an atmosphere of argon. These alloys were pulverized in a planetary ball mill with the addition of the necessary amount of the magnesium powder. Then the resulting homogeneous mixture was compressed into tablets, wrapped in tantalum foil, placed in a steel pipe and a homogenization annealing was performed at 950 °C for 6 hours. The thus prepared alloys consisted of 70–80 wt.% of the intermetallic compound phase with the structural type PuNi_3 and impurity phases $\text{La}_4\text{MgNi}_{19}$ and LaNi_5 .

The hydrogen sorption properties of intermetallic compounds prepared were studied. It was established that the isotherms $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9 - \text{H}_2$ have one plateau of phase transition, indicating the formation of only one hydride phase with hydrogen content of 1.58 wt.% ($\text{La}_2\text{MgNi}_9\text{H}_x$), 1.52 wt.% ($\text{La}_{1.9}\text{Mg}_{1.1}\text{Ni}_9\text{H}_x$) and 1.5 wt.% ($\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Ni}_9\text{H}_x$). At that the equilibrium pressure is increased by rise the magnesium content in the sample. The variations in the enthalpy at dehydrogenation are calculated and it is established the rise of the thermal effect of the reaction with increasing magnesium content.

Keywords: hydrogen, magnesium, lanthanum, nickel, the intermetallic compound, hydride phase, hydrogen storage, hydrogen sorption properties.

Владимир Бронеславович Сон

Сведения об авторе: аспирант Института проблем химической физики РАН.

Образование: МГУ им. М.В. Ломоносова (2012).

Область научных интересов: водород, гидриды, интерметаллиды, сплавы, водород-аккумулирующие материалы.

Vladimir B. Son

Information about author: graduate student, Institute of Problems of Chemical Physics of RAS.

Education: Moscow State University (2012).

Research area: hydrogen, hydrides, intermetallics, alloys, hydrogen storage materials.

Юстинас Яуносович Шимкус

Сведения об авторе: инженер Института проблем химической физики РАН.

Образование: Московский инженерно-физический институт (2014).

Область научных интересов: водород, гидриды, интерметаллиды, сплавы, водород-аккумулирующие материалы.

Justinas Ya. Shimkus

Information about author: engineer, Institute of Problems of Chemical Physics of RAS.

Education: Moscow Engineering and Physics Institute (2014).

Research area: hydrogen, hydrides, intermetallics, alloys, hydrogen storage materials.

Борис Петрович Тарасов

Сведения об авторе: канд. хим. наук, зав. лаб. Института проблем химической физики РАН.

Образование: химический факультет МГУ (1978).

Область научных интересов: химия гидридов и углеродных наноструктур, водородное и углеродное материаловедение, водородная энергетика.

Публикации: более 400.

База РИНЦ: статей – 240, цитирований – 2050, индекс Хирша – 20.

Boris P. Tarasov

Information about the author: Head of Laboratory of Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Ph.D.

Education: Chemical Department, Moscow State University (1978).

Research area: chemistry of hydrides and carbon nanostructures, hydrogen and carbon material science, hydrogen energy.

Publications: more than 400.

E-library: 240 papers, 2050 citations, h-index 20.

Роман Денис

Сведения об авторе: старший научный сотрудник Института энергетических технологий, Норвегия.

Образование: Львовский национальный университет (1997).

Область научных интересов: водород-аккумулирующие материалы, гидриды, интерметаллиды, хранение водорода, аккумуляторы.

Публикации: в базе Web of Science: статей – 65, цитирований – 750, индекс Хирша – 16.

Roman Denys

Information about author: Senior scientist, Institute for Energy Technology, Norway.

Education: Ivan Franko National University of Lvov (1997).

Research area: hydrogen storage materials, hydrides, intermetallics, hydrogen storage and battery applications.

Publications: Web of Science: 65 papers, 750 citations, h-index 16.

Володимир Яртысь

Сведения об авторе: профессор Института энергетических технологий, Норвегия.

Образование: Львовский национальный университет (1975).

Область научных интересов: наноматериалы для энергетики, водородная энергетика, интерметаллиды и углеродные материалы для хранения водорода, водород-аккумулирующие системы, NiMH перезаряжаемые батарейки.

Публикации: в базе Web of Science: статей – 170, цитирований – 2150, индекс Хирша – 25.

Volodymyr Yartys

Information about author: professor, Institute for Energy Technology, Norway.

Education: Ivan Franko National University of Lvov (1975).

Research area: nanomaterials for energy storage, hydrogen storage systems, hydrogen energy, intermetallics and carbon materials for hydrogen storage, NiMH rechargeable batteries.

Publications: Web of Science: 170 papers, 2150 citations, h-index – 25.



Введение

Одной из важнейших задач, успешное решение которой во многом будет способствовать дальнейшему прогрессу водородной энергетики, является организация технически и экономически эффективного хранения и транспортировки водорода [1]. Для компактного и безопасного хранения водорода предлагается использовать металлогидридный способ, основанный на обратимой реакции гидрирования различных металлов, интерметаллических соединений, сплавов и композиционных материалов на их основе [1, 2]. Достоинствами металлогидридных аккумуляторов являются высокое объемное содержание водорода, широкий интервал рабочих давлений и температур, постоянство давления при гидрировании и дегидрировании, регулируемость давления и скорости выделения водорода, компактность и безопасность [2–4]. Чаще всего в качестве гидридообразующих материалов используются интерметаллические соединения на основе LaNi_5 , где часть La замещается на другие редкоземельные элементы, а часть Ni – на 3d-металлы [3–5]. Для уменьшения стоимости материалов и увеличения водородсорбционной емкости заманчиво заменить часть дорогого и тяжелого редкоземельного металла на доступный и легкий магний. Оказалось, что в структуре LaNi_5 (стр. тип CaCu_5) такая замена невозможна, но в структуре LaNi_2 (стр. тип MgZn_2) лантан можно изоморфно замещать на магний до состава MgNi_2 , который гидрируется с образованием MgNi_2H_3 при высоком давлении водорода [6]. В связи с этим становится возможным создание интерметаллических соединений $(\text{La},\text{Mg})_3\text{Ni}_9$, где в структуре La_3Ni_9 или LaNi_3 (стр. тип PuNi_3), состоящей из фрагментов $[\text{LaNi}_5]$ и $[\text{La}_2\text{Ni}_4]$, часть лантана в La_2Ni_4 заменена на магний [7–9] (рис. 1).

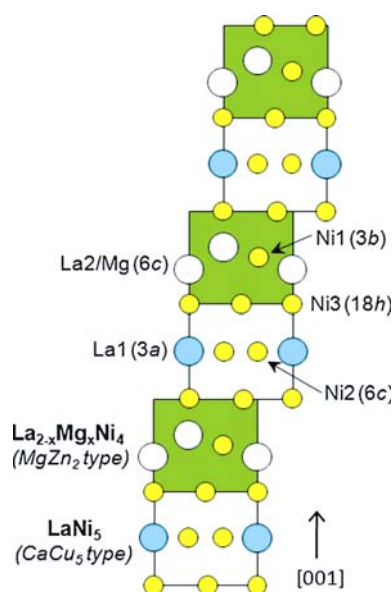


Рис. 1. Кристаллическая структура $(\text{La},\text{Mg})\text{Ni}_3$
Fig. 1. Crystal structure of $(\text{La},\text{Mg})\text{Ni}_3$

Известно, что интерметаллические соединения RNi_3 , где R – редкоземельный металл, поглощают водород с образованием гидридной фазы до состава RNi_3H_5 [10–13]. Можно было ожидать, что интерметаллиды $(\text{La},\text{Mg})\text{Ni}_3$ или, как чаще принято, $(\text{La},\text{Mg})_3\text{Ni}_9$ тоже будут сорбировать при мягких условиях такое же количество водорода.

Ранее было установлено, что в тройных сплавах $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$ происходит линейное увеличение объема элементарной ячейки с ростом отношения La/Mg , замена лантана на магний увеличивает массовое содержание водорода в гидриде и с увеличением количества магния растет давление гидридообразования (рис. 2) [7–9].

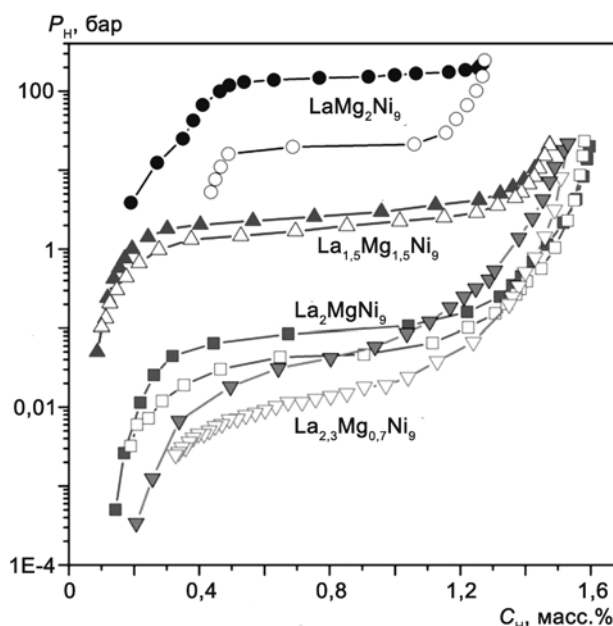


Рис. 2. Изотермы сорбции-десорбции в системах $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9\text{-H}_2$ при 20 °C (черные символы – абсорбция, белые символы – десорбция) [7]

Fig. 2. Absorption-desorption isotherms in the systems $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9\text{-H}_2$ at 20 °C (absorption: black symbols; desorption: white symbols) [7]

При приготовлении интерметаллических соединений $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$ возникает проблема получения однофазных сплавов, что сильно влияет на водородсорбционные характеристики. Для гомогенизации и увеличения содержания основной фазы предложено использовать многочасовой отжиг при температурах 900–950 °C [7–9].

Следует отметить, что литературных источников, описывающих исследование взаимодействия с водородом новых магнийсодержащих интерметаллических соединений, мало, результаты таких работ нередко противоречивы, а наиболее перспективные составы не выявлены, поэтому целью данной работы является комплексное исследование систем $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9\text{-H}_2$, где $x = 1; 1,1; 1,2$.

Методика эксперимента

Интерметаллические соединения выплавлялись в Норвежском институте энергетических технологий. Электродуговой плавкой в атмосфере аргона из порошков исходных металлов (чистота никеля 99,99 масс.%, лантана – 99,79 масс.%) в необходимом стехиометрическом соотношении получали сплавы системы La–Ni. Затем полученный сплав измельчали в планетарной шаровой мельнице и к нему добавляли порошок магния (чистота Mg 99,95 масс.%). Смесь спрессовывали в таблетки (10 МПа, 1–3 мин), которые заворачивали в танталовую фольгу, помещали в стальную трубу в атмосфере аргона и проводили гомогенизационный отжиг при температуре 950 °C на протяжении 6 ч. Последующие операции проводили в Лаборатории водород-аккумулирующих материалов ИПХФ РАН.

Все полученные образцы были исследованы методом рентгеновской дифракции порошка с помощью дифрактометра ДРОН-УМ2.

Состав образцов исследуемых интерметаллических соединений контролировали химическим анализом на содержание элементов – Ni, La и Mg. Содержание никеля определяли фотометрическим методом после взаимодействия Ni^{2+} с диметилглиоксимом в щелочной среде в присутствии персульфата аммония. Оптическую плотность анализируемого и стандартных растворов измеряли на спектрофотометре СФ-46 при длине волны 530 нм в кювете с длиной поглощающего слоя 1 см. Содержание никеля в анализируемом растворе определяли по предварительно построенному калибровочному графику. Методика позволяет проводить определение никеля в присутствии остальных компонентов сплава.

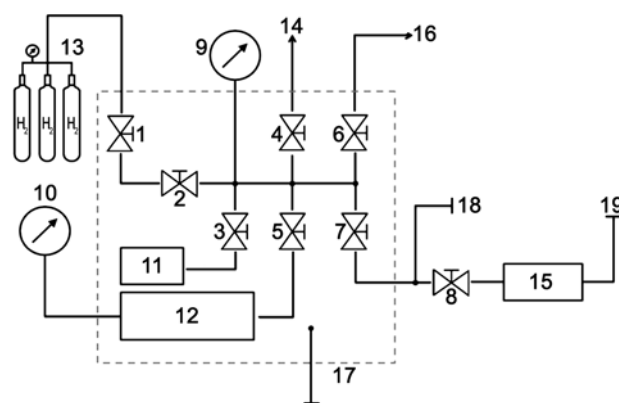


Рис. 3. Схема установки для гидрирования образцов: 1 – запорный вентиль; 2–8 – регулирующие вентили; 9 – датчик давления до 25 атм; 10 – датчик давления до 1 атм; 11 – пробирочник (50 мл); 12 – пробирочник (300 мл); 13 – аккумулятор водорода; 14 – форвакуумный насос; 15 – автоклав; 16 – сброс; 17–19 – термопары

Fig. 3. Experimental plant for the hydrogenation of samples: 1 – isolating valve; 2–8 – control valves; 9 – pressure sensor (25 atm); 10 – pressure sensor (1 atm); 11 – trier (50 ml); 12 – trier (300 ml); 13 – hydrogen source; 14 – backing pump; 15 – autoclave; 16 – relief; 17–19 – thermocouples

Методика определения лантана аналогична методике определения никеля: длина волны для лантана составляет 650 нм.

Содержание магния определяли двумя методами: комплексонометрическим титрованием раствора и атомно-адсорбционной спектроскопией паров в ацетилен-воздушном пламени при длине волны 285,2 нм.

Водородсорбционные свойства интерметаллидов исследовали на установке, схема которой представлена на рис. 3.

Для расчета поглощенного или выделившегося водорода применяли уравнение идеального газа, так как в данной работе используются относительно невысокие давления и температуры [5]:

$$\Delta n = \left(\frac{P_1 V_1}{RT_1} + \frac{P_2 V_2}{RT_2} \right) - \left(\frac{P_3 V_1}{RT_1} + \frac{P_3 V_2}{RT_2} \right),$$

где Δn – количество поглощенного (выделившегося) водорода, моль; P_1 – давление в автоклаве, атм; V_1 – объем автоклава, мл; R – универсальная газовая постоянная, атм·мл/(моль·К); T_1 – температура автоклава, К; P_2 – давление в системе, атм; V_2 – объем системы, мл; T_2 – температура в системе, К; P_3 – равновесное давление, атм.

Все образцы активировали в вакууме при 300 °C в течение 40 мин. Изотермы снимали при температурах от 30 до 80 °C и давлениях от 0,01 атм до 15 атм.

Результаты и их обсуждение

Анализ дифрактограмм выплавленных образцов показал, что все сплавы содержат в качестве основной фазы (70–80%) интерметаллид со структурным типом PuNi_3 , а в качестве примесей – фазу La_2MgNi_9 ; сплав $\text{La}_{1,8}\text{Mg}_{1,2}\text{Ni}_9$ также содержит еще и примесную фазу LaNi_5 . В табл. 1 приведены результаты химического анализа сплавов $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$.

Таблица 1
Результаты химического анализа образцов $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$ ($x=1; 1,1; 1,2$)

Table 1
Chemical analysis of the samples $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$ ($x=1; 1,1; 1,2$)

Образец	Содержание металлов, масс.%		
	La	Mg	Ni
La_2MgNi_9	35,6	2,8	61,5
$\text{La}_{1,9}\text{Mg}_{1,1}\text{Ni}_9$	34,8	3,0	62,5
$\text{La}_{1,8}\text{Mg}_{1,2}\text{Ni}_9$	32,3	3,4	63,5

Для систем $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9\text{--H}_2$ построены изотермы сорбции и десорбции при различных температурах (рис. 4–6).

Наличие только одного плато на изотермах всех сплавов свидетельствует о том, что гидрирование сопровождается образованием одной гидридной фа-

зы с содержанием водорода 1,58 масс.% (La_2MgNi_9), 1,52 масс.% ($\text{La}_{1,9}\text{Mg}_{1,1}\text{Ni}_9$) и 1,5 масс.% ($\text{La}_{1,8}\text{Mg}_{1,2}\text{Ni}_9$).

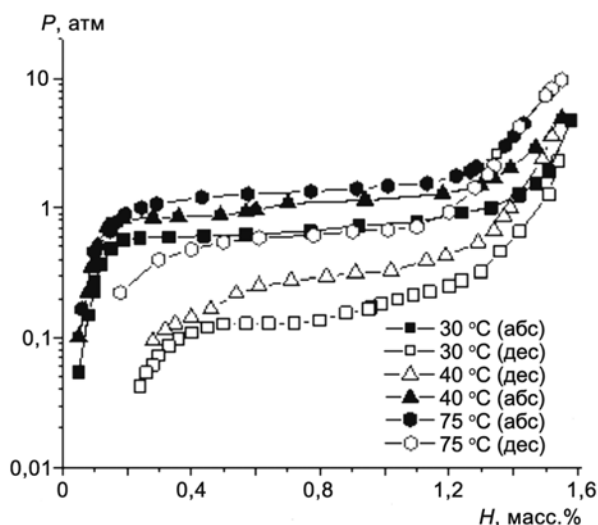


Рис. 4. Изотермы сорбции-десорбции для системы $\text{La}_2\text{MgNi}_9\text{-H}_2$ при температурах 30, 40 и 75 °C
Fig. 4. Absorption-desorption isotherms in system $\text{La}_2\text{MgNi}_9\text{-H}_2$ at 30, 40 and 75 °C

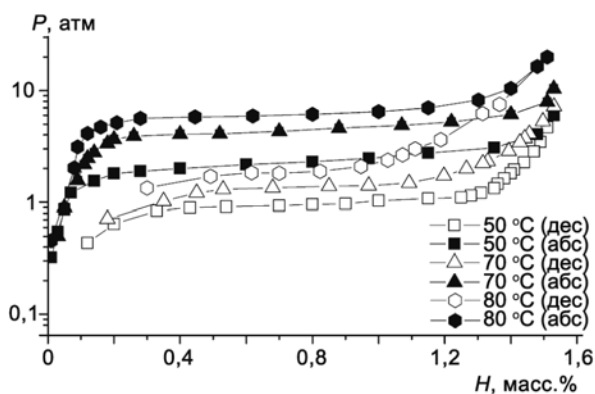


Рис. 5. Изотермы сорбции-десорбции для системы $\text{La}_{1,9}\text{Mg}_{1,1}\text{Ni}_9\text{-H}_2$ при температурах 50, 70 и 80 °C
Fig. 5. Absorption-desorption isotherms in $\text{La}_{1,9}\text{Mg}_{1,1}\text{Ni}_9\text{-H}_2$ system at 50, 70 and 80 °C

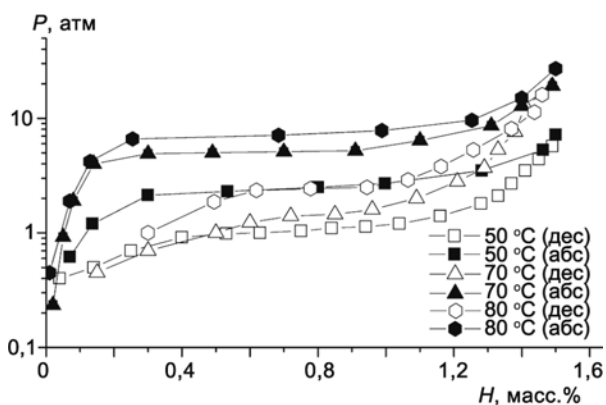


Рис. 6. Изотермы сорбции-десорбции для системы $\text{La}_{1,8}\text{Mg}_{1,2}\text{Ni}_9\text{-H}_2$ при температурах 50, 70 и 80 °C
Fig. 6. Absorption-desorption isotherms in $\text{La}_{1,8}\text{Mg}_{1,2}\text{Ni}_9\text{-H}_2$ system at 50, 70 and 80 °C

Установлено, что при увеличении содержания магния в образце увеличивается равновесное давление (рис. 7). Это происходит из-за того, что при замене лантана на магний уменьшаются параметры элементарной ячейки.

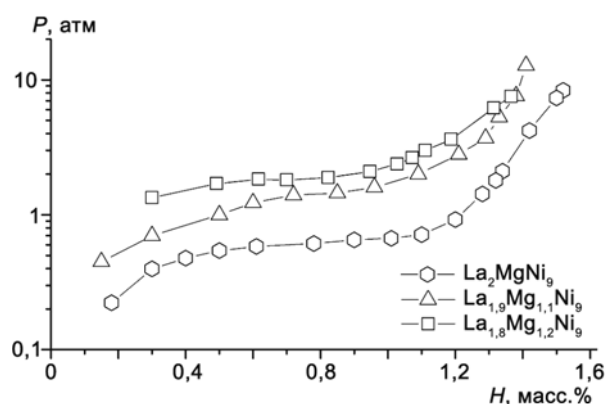


Рис. 7. Изотермы десорбции для систем $\text{La}_2\text{MgNi}_9\text{-H}_2$, $\text{La}_{1,9}\text{Mg}_{1,1}\text{Ni}_9\text{-H}_2$ и $\text{La}_{1,8}\text{Mg}_{1,2}\text{Ni}_9\text{-H}_2$ при 80 °C
Fig. 7. Desorption isotherms in systems $\text{La}_2\text{MgNi}_9\text{-H}_2$, $\text{La}_{1,9}\text{Mg}_{1,1}\text{Ni}_9\text{-H}_2$ and $\text{La}_{1,8}\text{Mg}_{1,2}\text{Ni}_9\text{-H}_2$ at 80 °C

С помощью полученных изотерм были построены прямые Вант-Гоффа. В качестве примера на рис. 8 представлены прямые, построенные для системы $\text{La}_{1,9}\text{Mg}_{1,1}\text{Ni}_9\text{-H}_2$.

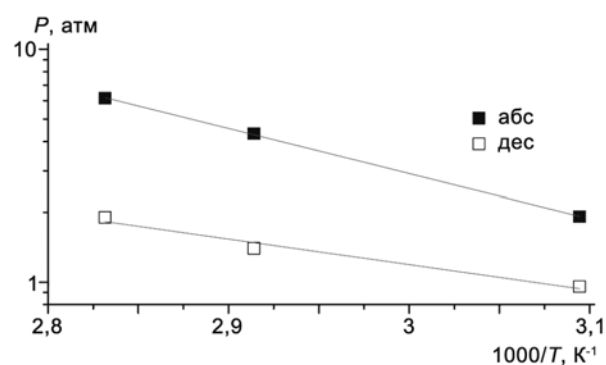


Рис. 8. Прямые Вант-Гоффа для системы $\text{La}_{1,9}\text{Mg}_{1,1}\text{Ni}_9\text{-H}_2$
Fig. 8. Vant-Hoff's plots for the system $\text{La}_{1,9}\text{Mg}_{1,1}\text{Ni}_9\text{-H}_2$

С помощью построенных прямых были рассчитаны изменения энтальпии и энтропии при дегидрировании, полученные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изменение энтальпии и энтропии при дегидрировании образцов $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9\text{H}_{11-13}$

Table 2

Changes of enthalpy and entropy at the dehydrogenation of $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9\text{H}_{11-13}$

Металлическая фаза	ΔH , кДж/моль H_2	ΔS , Дж/К·моль H_2
La_2MgNi_9	$38 \pm 3,0$	107 ± 5
$\text{La}_{1,9}\text{Mg}_{1,1}\text{Ni}_9$	$35,2 \pm 1,8$	106 ± 4
$\text{La}_{1,8}\text{Mg}_{1,2}\text{Ni}_9$	$34,1 \pm 1,3$	108 ± 4

Установленное понижение теплового эффекта реакции гидрирования с увеличением содержания магния, вероятно, связано с уменьшением параметров элементарной ячейки при замене лантана на магний.

Заключение

Синтезированные сплавы $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$ ($x = 1; 1,1; 1,2$) на 70–80% состоят из основной фазы гексагонального типа PuNi_3 . В качестве примеси во всех сплавах присутствует фаза $\text{La}_4\text{MgNi}_{19}$, а в составе сплава $\text{La}_{1,8}\text{Mg}_{1,2}\text{Ni}_9$ еще имеется фаза LaNi_5 . При

исследовании водородсорбционных характеристик полученных сплавов установлено образование одной гидридной фазы и показано, что максимальную водородоемкость имеет сплав La_2MgNi_9 при 30 °С – ~1,6 масс.%. Для всех сплавов рассчитаны изменения энтропии и энтальпии при дегидрировании. Показана зависимость изменения энтальпии при дегидрировании от содержания магния в сплаве.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-00642).

Список литературы

1. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яртис В.А. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумуляции водорода // Российский химический журнал. 2006. Т. L, № 6. С. 34-48 (Tarasov B.P., Lototskii M.V., Yartys V.A. Problem of hydrogen storage and prospective uses of hydrides for hydrogen accumulation // Russian journal of general chemistry. 2007. Vol. 77, Iss. 4. P. 694-711).
2. Tarasov B.P. Metal-hydride accumulators and generators of hydrogen for feeding fuel cells // International Journal of Hydrogen Energy. 2011. Vol. 36, No. 1. P. 1196-1199.
3. Тарасов Б.П. Физика и химия водород-аккумулирующих материалов / в кн. Органические и гибридные наноматериалы: тенденции и перспективы / под ред. Разумова В.Ф., Ключева М.В. Иваново: ИвГУ, 2013.
4. Тарасов Б.П. Материалы и системы для водородного аккумуляции энергии для возобновляемой энергетики // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. 2013. № 15. С. 10-16.
5. Тарасов Б.П., Володин А.А., Фурсиков П.В., Сивак А.В., Кашин А.М. Системы аккумуляции энергии // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. 2014. № 22. С. 30-41.
6. Yartys V.A., Antonov V.E., Beskrovnyy A.I., Crivello J.-C., Denys R.V., Fedotov V.K., Gupta M., Kulakov V.I., Kuzovnikov M.A., Latroche M., Morozov Yu.G., Sheverev S.G., Tarasov B.P. Hydrogen assisted phase transition in a trihydride MgNi_2H_3 synthesized at high H_2 pressures: thermodynamics, crystallographic and electronic structures // Acta Materialia. 2015. Vol. 82. P. 316-327.
7. Kadir K., Sakai T., Uehara I. Structural investigation and hydrogen storage capacity of LaMg_2Ni_9 and $(\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35})(\text{Mg}_{1.32}\text{Ca}_{0.68})\text{Ni}_9$ of the AB_2C_9 type structure // Journal of Alloys and Compounds. 2000. Vol. 302. P. 112-117.

References

1. Tarasov B.P., Lototskij M.V., Ârtys' V.A. Problema hraneniâ vodoroda i perspektivy ispol'zovaniâ gidridov dlâ akumulirovaniâ vodoroda // Rossijskij himičeskij žurnal. 2006. T. L, № 6. S. 34-48 (Tarasov B.P., Lototskii M.V., Yartys V.A. Problem of hydrogen storage and prospective uses of hydrides for hydrogen accumulation // Russian Journal of General Chemistry. 2007. Vol. 77, Iss. 4. P. 694-711).
2. Tarasov B.P. Metal-hydride accumulators and generators of hydrogen for feeding fuel cells // International Journal of Hydrogen Energy. 2011. Vol. 36, No. 1. P. 1196-1199.
3. Tarasov B.P. Fizika i himiâ vodorod-akkumulirûših materialov / v kn.. Organičeskie i gibridnye nanomaterialy: tendencii i perspektivy / pod red. Razumova V.F., Klûeva M.V. Ivanovo: IvGU, 2013.
4. Tarasov B.P. Materialy i sistemy dlâ vodorodnogo akumulirovaniâ ènergii dlâ vozobnovlâemoj ènergetiki // Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAE. 2013. № 15. С. 10-16.
5. Tarasov B.P., Volodin A.A., Fursikov P.V., Sivak A.V., Kašin A.M. Sistemy akumulirovaniâ ènergii // Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAE. 2014. № 22. S. 30-41.
6. Yartys V.A., Antonov V.E., Beskrovnyy A.I., Crivello J.-C., Denys R.V., Fedotov V.K., Gupta M., Kulakov V.I., Kuzovnikov M.A., Latroche M., Morozov Yu.G., Sheverev S.G., Tarasov B.P. Hydrogen assisted phase transition in a trihydride MgNi_2H_3 synthesized at high H_2 pressures: thermodynamics, crystallographic and electronic structures // Acta Materialia. 2015. Vol. 82. P. 316-327.
7. Kadir K., Sakai T., Uehara I. Structural investigation and hydrogen storage capacity of LaMg_2Ni_9 and $(\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35})(\text{Mg}_{1.32}\text{Ca}_{0.68})\text{Ni}_9$ of the AB_2C_9 type structure // Journal of Alloys and Compounds. 2000. Vol. 302. P. 112-117.

8. Denys R.V., Yartys V.A. Effect of magnesium on the crystal structure and thermodynamics of the $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$ hydrides // Journal of Alloys and Compounds. 2011. Vol. 509S. P. 540-548.

9. Yartys V., Denys R. Structure-properties relationship in $\text{RE}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9\text{H}_{10-13}$ (RE = La, Pr, Nd) hydrides for energy storage // Journal of Alloys and Compounds. 2015. Vol. 645S. P. 412-418.

10. Бурнашева В.В., Тарасов Б.П., Семененко К.Н. Гидридные фазы системы $\text{RNi}_3\text{-H}_2$, где R – РЗМ цериевой подгруппы // Журнал неорганической химии. 1982. Т. 27, № 12. С. 3039-3042.

11. Бурнашева В.В., Тарасов Б.П. Абсорбция водорода интерметаллическими соединениями RNi_3 , где R – редкоземельный металл иттриевой подгруппы // Журнал неорганической химии. 1982. Т. 27, № 8. С. 1906-1910.

12. Бурнашева В.В., Тарасов Б.П. Некоторые гидридные фазы систем $\text{RNi}_3\text{-H}_2$, где R = Y, Gd, Dy, Ho // Журнал неорганической химии. 1982. Т. 27, № 9. С. 2439-2440.

13. Бурнашева В.В., Тарасов Б.П. Влияние частичной замены никеля или иттрия другими металлами на абсорбцию водорода соединением YNi_3 // Журнал неорганической химии. 1984. Т. 29, № 5. С. 1136-1141.

8. Denys R.V., Yartys V.A. Effect of magnesium on the crystal structure and thermodynamics of the $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9$ hydrides // Journal of Alloys and Compounds. 2011. Vol. 509S. P. 540-548.

9. Yartys V., Denys R. Structure-properties relationship in $\text{RE}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9\text{H}_{10-13}$ (RE = La, Pr, Nd) hydrides for energy storage // Journal of Alloys and Compounds. 2015. Vol. 645S. P. 412-418.

10. Burnaševa V.V., Tarasov B.P., Semenenko K.N. Gidridnye fazy sistemy $\text{RNi}_3\text{-H}_2$, gde R – RZM cerievoj podgruppy // Žurnal neorganičeskoj himii. 1982. T. 27, № 12. S. 3039-3042.

11. Burnaševa V.V., Tarasov B.P. Absorbcia vodoroda intermetalličeskimi soedineniâmi RNi_3 , gde R – redkozemel'nyj metall ittrievoj podgruppy // Žurnal neorganičeskoj himii. 1982. T. 27, № 8. S. 1906-1910.

12. Burnaševa V.V., Tarasov B.P. Nekotorye gidridnye fazy sistem $\text{RNi}_3\text{-H}_2$, gde R = Y, Gd, Dy, Ho // Žurnal neorganičeskoj himii. 1982. T. 27, № 9. S. 2439-2440.

13. Burnaševa V.V., Tarasov B.P. Vliânie častičnoj zameny nikelâ ili ittriâ drugimi metallami na absorbcii vodoroda soedineniem YNi_3 // Žurnal neorganičeskoj himii. 1984. T. 29, № 5. S. 1136-1141.

Транслитерация по ISO 9:1995

