

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА  
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 546.3-19'654'46'73'11

ВОДОРОДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ  
 $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Co}_9$  ( $x = 1.2, 1.5, 2$ )

© 2020 г. В. Б. Сон<sup>а, \*</sup>, Б. П. Тарасов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем химической физики РАН,  
пр-т Академика Семенова, 1, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

\*e-mail: son@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 15.04.2019 г.

После доработки 31.07.2019 г.

Принята к публикации 27.09.2019 г.

Магнийсодержащие интерметаллические соединения типа  $\text{AB}_3$  нередко обладают повышенной, по сравнению с соединениями типа  $\text{AB}_5$ , водородсорбционной емкостью и являются перспективными материалами для металлгидридных аккумуляторов и компрессоров водорода, а также для никель-металлогидридных перезаряжаемых источников тока. Для определения влияния замены лантана на магний в интерметаллиде  $\text{LaCo}_3$  с целью возможного повышения водородсорбционных свойств получены и изучены интерметаллические соединения  $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Co}_9$  ( $x = 1.2, 1.5, 2$ ). Исследованы водородсорбционные свойства сплавов при температурах 303–343 К и давлениях 0.1–25 атм, показано образование двух гидридных фаз. Установлено, что максимальная емкость по водороду составляет  $0.62 \pm 0.08$  мас. % для  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$ ,  $0.30 \pm 0.03$  мас. % для  $\text{La}_{1.5}\text{Mg}_{1.5}\text{Co}_9$  и  $0.75 \pm 0.09$  мас. % для  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$ . Показано, что объем элементарных ячеек при гидрировании увеличивается на 13.8% для  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$  и 16.5% для  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$ . Построены кривые поглощения водорода интерметаллидами и проведен сравнительный анализ полученных данных.

*Ключевые слова:* водород, интерметаллическое соединение, сплав, гидрид, гидрирование, сорбция

DOI: 10.31857/S0044457X20020191

## ВВЕДЕНИЕ

Для компактного и безопасного хранения и компримирования водорода часто применяется металлгидридный способ, основанный на обратимом гидрировании интерметаллических соединений, особенно типов  $\text{AB}_5$ ,  $\text{AB}_3$  и  $\text{AB}_2$  [1–4]. Соединения этих типов используются и в никель-металлогидридных аккумуляторах [5–7]. Наибольший интерес вызывают интерметаллиды типа  $\text{AB}_3$ , так как их удельная емкость на 25% больше, чем у соединений типа  $\text{AB}_5$  [8–11]. Гидридные фазы соединений редкоземельных металлов (А) с металлами триады железа (В) типа  $\text{AB}_3$ , по данным различных авторов, могут содержать больше водорода, чем гидриды на основе сплавов типа  $\text{AB}_5$  [1, 12–15].

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Типичный представитель интерметаллидов типа  $\text{AB}_3$  —  $\text{LaNi}_3$  — образует гидридную фазу  $\text{LaNi}_3\text{H}_5$  с содержанием водорода 1.8 мас. %, в то время как в гидриде  $\text{LaNi}_5\text{H}_{6.6}$  — 1.5 мас. % водорода [12, 14]. Большой интерес представляет замена в интерметаллических соединениях типа

$\text{AB}_3$  тяжелого и дорогого лантана на легкий и дешевый магний [16–18], так как он и его сплавы могут обратимо поглощать большое количество водорода [19, 20]. Известно, что структура интерметаллида  $\text{LaNi}_3$  состоит из чередующихся слоев  $\text{LaNi}_2$  и  $\text{LaNi}_5$ , а во фрагментах  $\text{LaNi}_2$  возможна замена лантана на магний [16–18, 21]. Оказалось, что магнийсодержащие интерметаллиды типа  $\text{AB}_3$  обладают повышенной водородсорбционной емкостью и являются перспективными материалами для металлгидридного хранения водорода и для никель-металлогидридных перезаряжаемых источников тока [18, 22–27]. В работе [28] показано, что при выплавке магнийсодержащих соединений происходит испарение части магния, вследствие чего состав образующихся сплавов не соответствует ожидаемому, а количество и состав примесных фаз могут отличаться в зависимости от условий плавки. Поэтому при получении магнийсодержащих интерметаллидов и сплавов проводят последующий гомогенизационный отжиг.

Интересно было изучить влияние замены La на Mg в интерметаллиде  $\text{LaCo}_3$  на его водородсорбционные свойства. В литературе отсутствуют данные об интерметаллидах с такой полной заме-

ной, но показано, что это возможно в интерметаллидах типа  $AB_3$  с небольшим содержанием кобальта [26, 27]. Поэтому можно ожидать, что, как и в случае с никельсодержащими интерметаллидами [16–18, 21, 22], введение в их состав магния улучшит водородсорбционные характеристики. Замена лантана на магний существенно уменьшает молярную массу сплава, а это, в свою очередь, увеличивает водородоемкость. В работах [16–18, 21] показано, что в случае с никельсодержащими интерметаллидами заменить лантан на магний в слоях  $AB_3$  методом плавки не удастся. Это связано, скорее всего, с тем, что интерметаллид  $MgNi_5$  не существует. Поскольку замена лантана на магний происходит только в слоях  $AB_2$ , а структура  $AB_3$  состоит из чередующихся слоев  $AB_3$  и  $AB_2$  в соотношении 1 : 2, составом с максимальной заменой лантана на магний будет  $LaMg_2Co_9$ , и еще необходимо синтезировать составы с меньшим содержанием магния, чтобы исследовать водородсорбционные свойства соединений этого ряда во всем диапазоне концентраций магния. Поэтому цель настоящей работы – получение и изучение водородсорбционных свойств интерметаллических соединений  $La_{3-x}Mg_xCo_9$  ( $x = 1.2, 1.5, 2$ ).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования были интерметаллические соединения  $La_{1.8}Mg_{1.2}Co_9$ ,  $La_{1.5}Mg_{1.5}Co_9$  и  $LaMg_2Co_9$ .

Фазовый состав сплавов и их гидридов изучали методом рентгенофазового анализа (РФА) при комнатной температуре на дифрактометре ДРОН 1М ( $CuK_\alpha$ -излучение) с последующей обработкой дифрактограмм с помощью специальной программы PowderCell, как и в работе [18]. Поскольку гидриды изучаемых интерметаллических соединений неустойчивы на воздухе, проводили их пассивацию монооксидом углерода [12, 17]. Для этого автоклав с образцом гидрида погружали в жидкий азот и сбрасывали избыточное давление водорода. Затем к системе подключали баллон с монооксидом углерода и оставляли на сутки под давлением, после чего извлекали образец гидрида из автоклава в сухом аргоновом боксе.

Исходные сплавы исследовали на оборудовании Аналитических центров коллективного пользования Института проблем химической физики РАН и Научного центра Российской академии наук в Черноголовке. Элементный состав интерметаллидов контролировали химическим анализом. Содержание La находили гравиметрически – селективным осаждением гидроксидов редкоземельного металла аммиаком из раствора образца сплава в кислоте. Содержание магния и кобальта измеряли с использованием атомно-адсорб-

ционной спектроскопии паров в ацетилен-воздушном пламени при  $\lambda = 285.2$  нм (Mg) и 240.7 нм (Co). Содержание водорода в гидридных фазах после снятия изотерм сорбция–десорбция определяли методом сжигания образца в токе кислорода с последующим поглощением образовавшейся воды безводным перхлоратом магния. Для этого навеску исследуемого образца в кварцевом стаканчике помещали в кварцевую трубку, которая в токе кислорода нагревалась до 1273 К. Образующаяся при этом вода улавливалась перхлоратом магния в поглотительной трубке. Содержание водорода вычисляли по формуле:

$$\%H = km_1/m_2 \times 100\%, \quad (1)$$

где  $m_1$  – привес поглотительной трубки, мг;  $m_2$  – масса навески гидрида, мг;  $k$  – содержание водорода в воде (0.1119).

Синтез интерметаллических соединений типа  $AB_3$  из элементов обычно затрудняется тем, что сложно контролировать содержание магния в полученном сплаве, так как при аргоновой плавке температура составляет  $\sim 3000$  К. Поэтому было предложено использовать прекурсор, который уже содержал магний и был достаточно хорошо изучен в литературе, – интерметаллическое соединение  $LaMg_3$ . Этот сплав получали сплавлением чистых металлов La (98%) и Mg (99.9%) в муфельной печи при температуре 1473 К. Затем к полученному прекурзору добавляли рассчитанные количества кобальта (99.7%) и лантана (98%) и полученную смесь подвергали электродуговой плавке в атмосфере аргона. Выплавленные сплавы измельчали в планетарно-шаровой мельнице в атмосфере водорода (250 оборотов, 1 ч,  $m_{\text{шаров}}/m_{\text{образца}} = 10/1$ ,  $P_{H_2} = 30$  атм). Помол в водородной среде был использован нами ранее в случае с интерметаллидом  $Y_2MgNi_9$ , что способствовало активации сплава, поэтому и в данной работе была выбрана та же газовая среда. Полученный порошок прессовали в таблетки (10 атм), которые затем помещали в кварцевую ампулу. Таблетки отжигали согласно температурному профилю (рис. 1) с последующей закалкой в холодной воде для увеличения доли основной фазы  $AB_3$  и равномерного распределения магния в образцах. Такой режим отжига интерметаллических соединений уже использовался для термической обработки никельсодержащих сплавов типа  $AB_3$  [17, 18, 24]. Было показано, что именно отжиг при температуре 1173 К дает наименьшее количество примесей.

Водородсорбционные свойства сплавов изучали с помощью установки, схема которой представлена на рис. 2.

Перед началом измерений все образцы 40 мин активировали в вакууме при 673 К. Затем выполняли один цикл полной абсорбции–десорбции, после которого проводили измерения. Изотермы

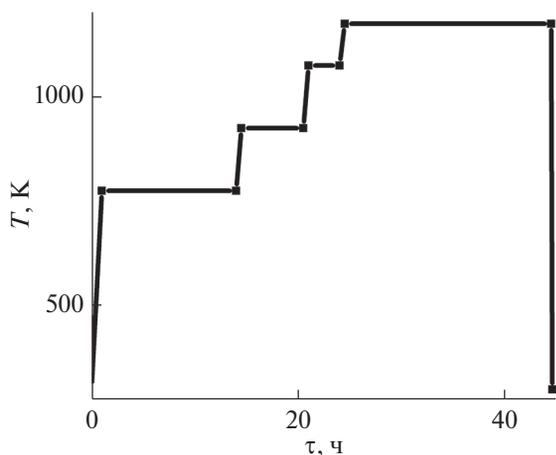


Рис. 1. Температурный профиль отжига образцов  $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Co}_9$  ( $x = 1.2, 1.5, 2$ ).

давление водорода—содержание водорода в гидриде в системе интерметаллид—водород были построены в интервале давлений 0.1–25 атм при температурах 303, 313, 323, 333 и 343 К. Следует отметить, что примесная фаза  $\text{LaCo}_5$  при данных условиях не образует гидрид [29]. Интервал температур 303–343 К был выбран в связи с возможностью поддерживать температуру в автоклаве с помощью водного термостата и сравнивать в дальнейшем построенные изотермы с изотермами для других систем.

Для расчета количества поглощенного или выделившегося водорода применяли уравнение идеального газа, так как в данной работе использовали относительно невысокие температуры и давления.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Фазовый и элементный состав исследуемых сплавов

Химический анализ полученного нами прекурсора показал, что он содержит  $66.9 \pm 3.0$  мас. % La и  $32.3 \pm 0.7$  мас. % Mg. Соотношение La и Mg соответствует брутто-формуле  $\text{LaMg}_{2.6 \pm 0.2}$ . По данным РФА, кроме основной (целевой) фазы со структурным типом  $\text{CeMg}_3$  в выплавленном спла-

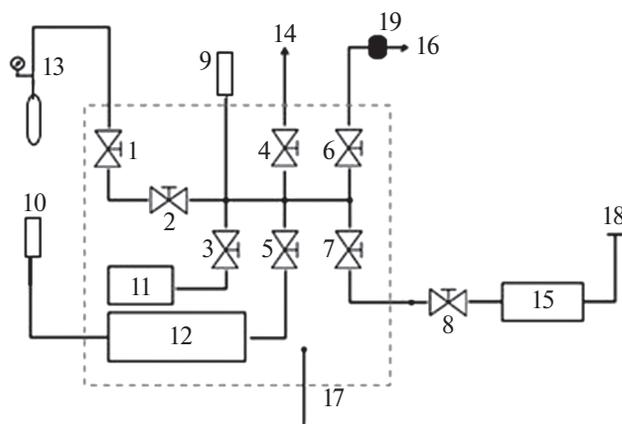


Рис. 2. Схема установки для гидрирования образцов: 1 – запорный вентиль; 2–8 – регулирующие вентили; 9 – датчик давления до 25 атм; 10 – датчик давления до 1 атм; 11 – пробоотборник 50 мл; 12 – пробоотборник 300 мл; 13 – аккумулятор водорода; 14 – форвакуумный насос; 15 – автоклав; 16 – сброс давления; 17, 18 – термопары, 19 – огнепреградитель, пунктирный контур – термостат.

ве присутствует  $\sim 10\%$  примеси состава  $\text{LaMg}_2$  со структурным типом  $\text{LaMg}_2$ .

Результаты анализа на содержание компонентов в интерметаллических соединениях  $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Co}_9$  ( $x = 1.2, 1.5, 2$ ) представлены в табл. 1. Поскольку из литературы [28] известно, что при выплавке магнийсодержащих соединений трудно добиться теоретически ожидаемого состава из-за испарения части магния, для удобства сравнения рассчитаны брутто-формулы  $\text{La}_{1.71}\text{Mg}_{1.29}\text{Co}_9$ ,  $\text{La}_{1.51}\text{Mg}_{1.49}\text{Co}_9$  и  $\text{La}_{1.17}\text{Mg}_{1.83}\text{Co}_9$ . Разница между ожидаемым и рассчитанным составом, как оказалось, связана с наличием примесной фазы  $\text{LaCo}_5$ .

По данным РФА, отожженные сплавы на 80% состоят из основной (целевой) фазы со структурным типом  $\text{PuNi}_3$  (рис. 3). Все сплавы в качестве примеси содержали  $\sim 20\%$   $\text{LaCo}_5$ . Согласно расчетам параметров элементарных ячеек сплавов, объем и параметры элементарной ячейки уменьшаются при добавлении магния к исходному сплаву  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$  (табл. 2). Это, скорее всего, связано с тем, что атомный радиус магния ( $1.72 \text{ \AA}$ ) практически вдвое меньше атомного радиуса

Таблица 1. Результаты химического анализа образцов  $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Co}_9$  ( $x = 1.2, 1.5, 2$ )

Образец	Содержание (теор.), мас. %		
	La	Mg	Co
$\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$	$29.7 \pm 2.4$ (30.9)	$3.9 \pm 0.5$ (3.6)	$65.7 \pm 3.7$ (65.5)
$\text{La}_{1.5}\text{Mg}_{1.5}\text{Co}_9$	$26.7 \pm 3.6$ (26.9)	$4.7 \pm 0.5$ (4.7)	$68.3 \pm 5.6$ (68.4)
$\text{LaMg}_2\text{Co}_9$	$21.7 \pm 2.9$ (19.4)	$6.0 \pm 0.4$ (6.8)	$72.1 \pm 4.1$ (73.9)

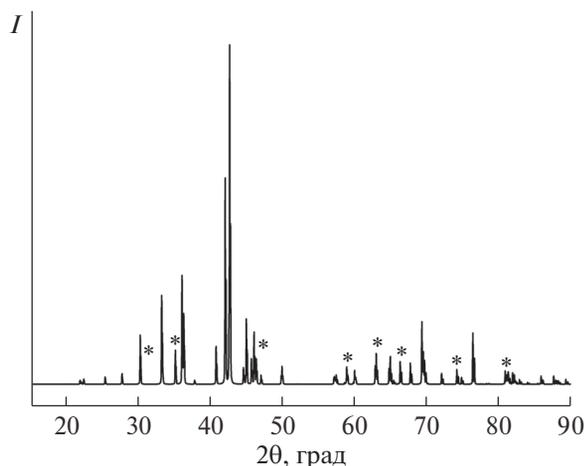


Рис. 3. Дифрактограмма образца  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$ , звездочкой обозначена примесная фаза.

лантана ( $2.74 \text{ \AA}$ ). Исходя из анализа литературных данных о невозможности замены части La на Mg в структурном типе  $\text{CaCu}_5$  [16–18, 21] и при полном соответствии параметров элементарной ячейки примесной фазы  $\text{LaCo}_5$  известным в литературе для фазы  $\text{LaCo}_5$ , можно полагать, что Mg практически не растворяется в примесной фазе.

#### Водородсорбционные свойства исследуемых сплавов

Для образцов  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$  и  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$  были построены изотермы абсорбции–десорбции водорода при температурах 303, 313, 323, 333 и 343 K (рис. 4). На всех изотермах наблюдаются два плато. Максимальное содержание водорода в гидридах при температуре 303 K составило  $0.62 \pm 0.08$  мас. % для  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$  и  $0.75 \pm 0.09$  мас. % для  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$ , что отвечает брутто-формулам  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{H}_{5.3}$  и  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{H}_{6.1}$ . Образец  $\text{La}_{1.5}\text{Mg}_{1.5}\text{Co}_9$  поглотил около 0.3 мас. % водорода при 30 атм в интервале температур 303–343 K, поэтому для данного интерметаллида изотермы не построены.

Химический анализ на содержание водорода показал, что гидриды сплавов содержат  $0.60 \pm 0.05$  ( $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$ ),  $0.28 \pm 0.06$  ( $\text{La}_{1.5}\text{Mg}_{1.5}\text{Co}_9$ ) и  $0.72 \pm 0.05$  ( $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$ ) мас. % водорода.

Для сравнительного анализа на рис. 5 приведены изотермы десорбции, построенные для систем

Таблица 2. Параметры элементарных ячеек интерметаллидов  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$ ,  $\text{La}_{1.5}\text{Mg}_{1.5}\text{Co}_9$  и  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$

Образец	$a$ , $\text{Å}$	$c$ , $\text{Å}$
$\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$	$4.982 \pm 0.004$	$24.173 \pm 0.014$
$\text{La}_{1.5}\text{Mg}_{1.5}\text{Co}_9$	$4.954 \pm 0.009$	$24.023 \pm 0.011$
$\text{LaMg}_2\text{Co}_9$	$4.943 \pm 0.006$	$23.932 \pm 0.016$

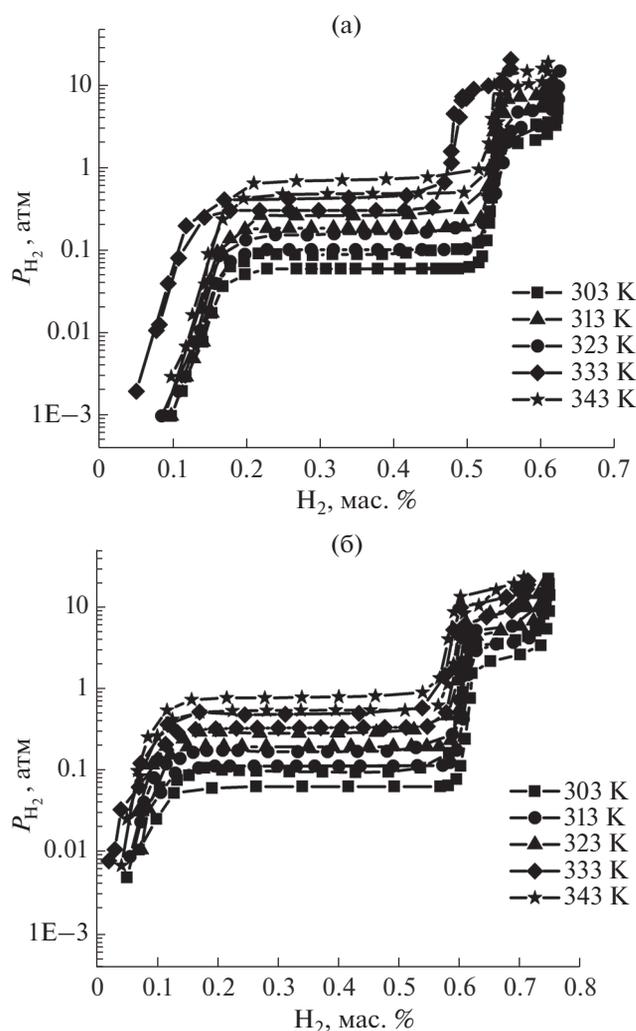


Рис. 4. Изотермы сорбции–десорбции для систем  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{--H}_2$  (а) и  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{--H}_2$  (б).

$\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{--H}_2$  и  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{--H}_2$  при одной и той же температуре (303 K). Из полученных кривых четко прослеживается влияние содержания магния в образцах на их водородсорбирующие свойства: увеличение количества магния в интерметаллиде практически не меняет равновесное давление, но максимальная водородоемкость при этом увеличивается.

По уравнению Вант-Гоффа построены зависимости давления от обратной температуры для систем  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{--H}_2$  (рис. 6а) и  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{--H}_2$  (рис. 6б). По этим графикам рассчитаны значения энтальпии и энтропии при дегидрировании (табл. 3).

Можно заметить, что практически отсутствуют корреляции между параметрами элементарной ячейки исходного соединения, равновесным давлением гидридообразования и энтальпией реакции. Аналогичную картину мы наблюдали и в

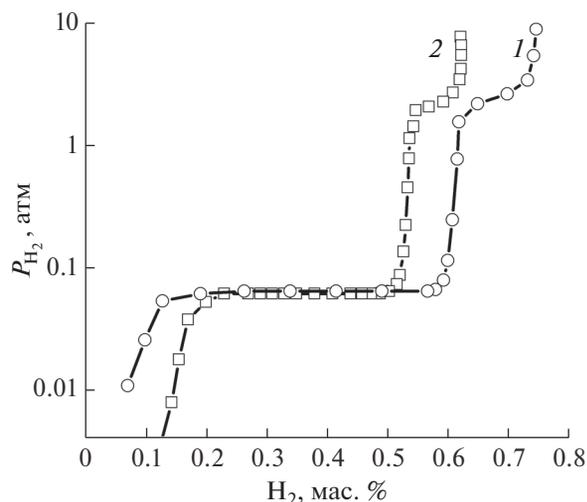


Рис. 5. Изотермы десорбции при температуре 303 К в системах  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{-H}_2$  (1) и  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{-H}_2$  (2).

случае никельсодержащих сплавов [17, 18]. Возможно, это обусловлено наличием примесей, но пока это предположение нуждается в дополнительном изучении.

По данным РФА, гидриды состоят на 80% из основной (целевой) фазы со структурным типом  $\text{PuNi}_3$  (рис. 7). Анализ рассчитанных параметров элементарных ячеек гидридов  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{H}_{5.3}$  и  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{H}_{6.1}$ , приведенных в табл. 4, показал, что в случае образца  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$  объем ячейки при гидрировании увеличивается на 13.8%, а для  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$  – на 16.5%.

Поскольку и в исходном сплаве, и в их гидридах присутствует примесная фаза  $\text{LaCo}_5$ , можно сделать вывод о том, что она не гидрируется при используемых температурах и давлениях, хотя не исключено ее каталитическое влияние на кинетику гидрирования сплавов.

Получены кривые поглощения водорода интерметаллидами в интервале температур 303–343 К (рис. 8). Установлено, что наименьшая скорость поглощения водорода сплавами  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$  и  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$  наблюдается при 343 К, а наибольшая – при 333 К ( $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$ ) и 313 К ( $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$ ). Для снятия кривых в автоклав подавалось давление водорода намного выше равновесного (22 атм). Показания давления фиксировались датчиком с

Таблица 3. Изменение энтальпии и энтропии при дегидрировании образцов  $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Co}_9\text{H}_{5.3-6.1}$

Гидрид	$\Delta H$ , кДж/моль $\text{H}_2$	$\Delta S$ , Дж/К моль $\text{H}_2$
$\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{H}_{5.3}$	$33.2 \pm 1.4$	$118 \pm 2$
$\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{H}_{6.1}$	$35.1 \pm 1.3$	$111 \pm 2$

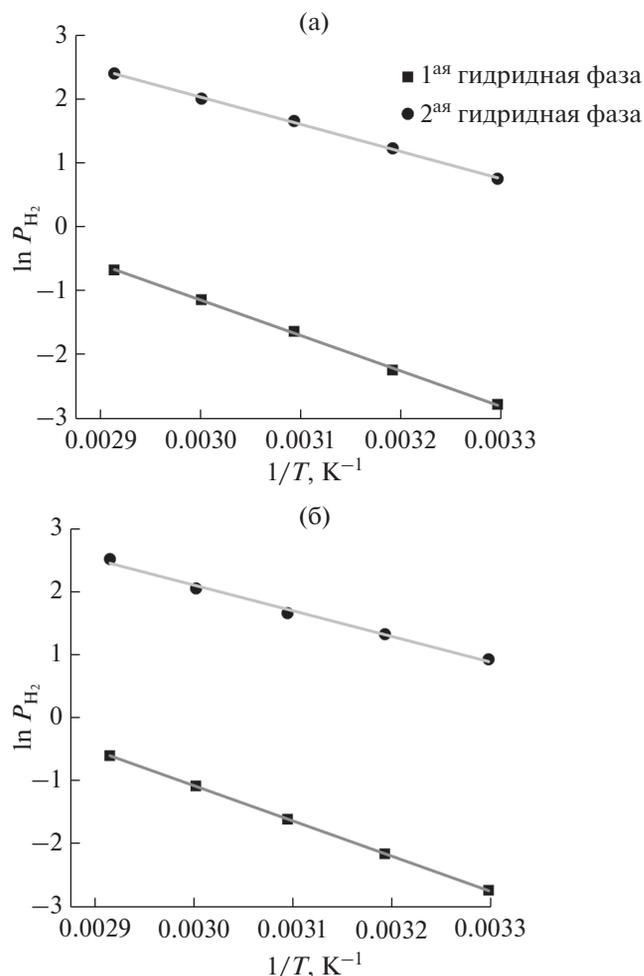


Рис. 6. Зависимости давления от обратной температуры для систем  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{-H}_2$  (а) и  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{-H}_2$  (б).

интервалом 0.2 с, а затем пересчитывались для степени превращения. На графиках прослеживается сложная зависимость скорости гидрирования от температуры, возможно, она обусловлена наличием примесей.

В табл. 5 приведено время гидрирования интерметаллидов, затрачиваемое для достижения определенной степени превращения. Следует отметить, что увеличение температуры влияет на скорость поглощения водорода сплавом  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$  больше, чем сплавом  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$ . Видно также, что замена никеля на кобальт значительно умень-

Таблица 4. Параметры элементарной ячейки  $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Ni}_9\text{H}_y$

Образец	$a$ , Å	$c$ , Å
$\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{H}_{5.3}$	$5.301 \pm 0.009$	$24.88 \pm 0.03$
$\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{H}_{6.1}$	$5.190 \pm 0.005$	$24.08 \pm 0.04$

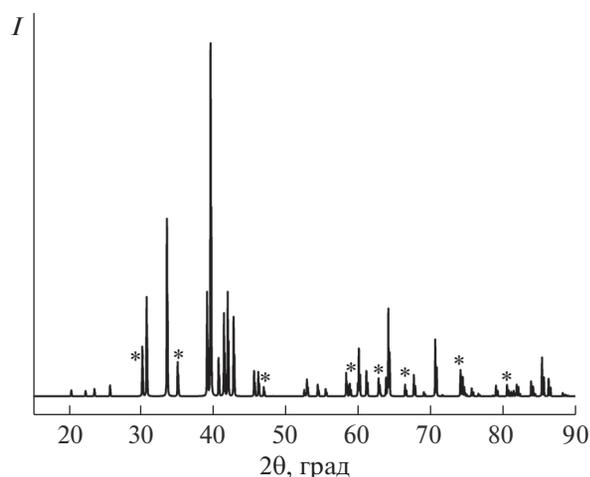


Рис. 7. Дифрактограмма образца  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{H}_{5.3}$ , звездочкой обозначена примесная фаза.

шает максимальную водородоемкость, однако скорость гидрирования увеличивается почти в 1.5 раза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы интерметаллические соединения  $\text{La}_{3-x}\text{Mg}_x\text{Co}_9$  ( $x = 1.2, 1.5, 2$ ) с примесью фазы  $\text{LaCo}_5$ . Установлено, что при их взаимодействии с водородом образуются две гидридные фазы, при этом примесная фаза  $\text{LaCo}_5$  не гидрируется. Показано, что замена лантана на магний в интерметаллидах  $\text{LaCo}_3$  уменьшает водородоемкость, но существенно увеличивает скорость гидрирования. Рассчитаны изменения энтропии и энтальпии десорбции в системах  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{-H}_2$  и  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{-H}_2$ . Установлено, что при гидрировании сплавов объем элементарных ячеек увеличивается на 13.8% в случае  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$  и на 16.5% для интерметаллида  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$ .

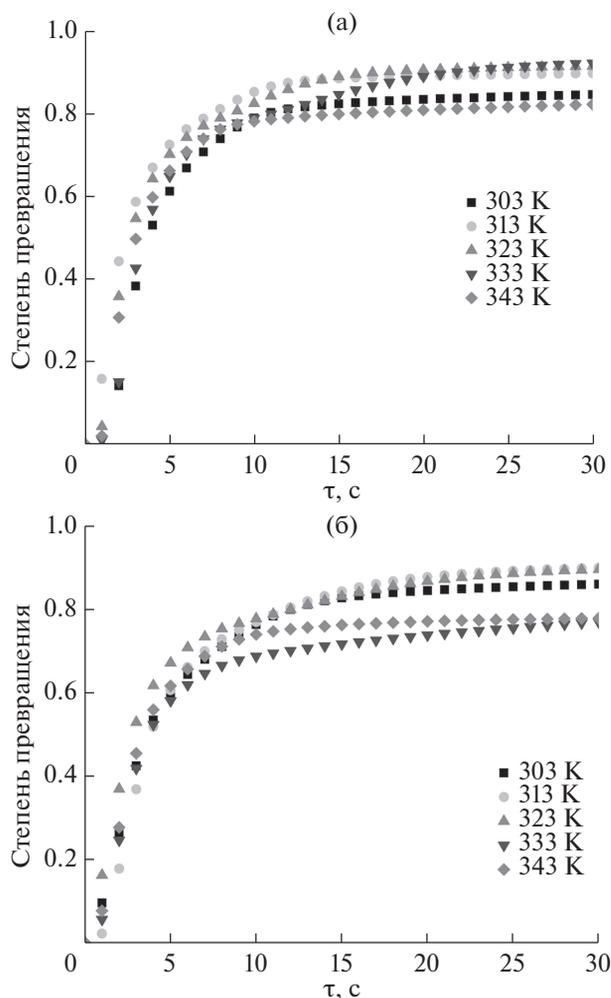


Рис. 8. Кривые поглощения водорода сплавами  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9$  (а) и  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9$  (б).

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (соглашение № 05.574.21.0209, идентификатор RFMEFI57418X0209).

Таблица 5. Время взаимодействия ( $\tau$ ) в системах  $\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{-H}_2$ ,  $\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{-H}_2$  и  $\text{La}_2\text{MgNi}_9\text{-H}_2$  при температуре 303 К

Степень превращения	$\text{La}_{1.8}\text{Mg}_{1.2}\text{Co}_9\text{-H}_2$		$\text{LaMg}_2\text{Co}_9\text{-H}_2$		$\text{La}_2\text{MgNi}_9\text{-H}_2$ [18]	
	$\tau$ , с	содержание $\text{H}_2$ , мас. %	$\tau$ , с	содержание $\text{H}_2$ , мас. %	$\tau$ , с	содержание $\text{H}_2$ , мас. %
0.3	2.6	0.19	2.2	0.23	6	0.5
0.5	3.8	0.31	3.9	0.38	12	0.8
0.8	9	0.48	12	0.60	41	1.2

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tarasov B.P., Lototskii M.V., Yartys' V.A.* // Russ. J. Gen. Chem. 2007. V. 77. № 4. P. 694. [*Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А.* // Рос. хим. журн. 2006. Т. 50. № 6. С. 34.]  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.093>
2. *Tarasov B.P.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2011. V. 36. № 1. P. 1196.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.002>
3. *Tarasov B.P., Bocharnikov M.S., Yanenko Y.B. et al.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43. № 9. P. 4415.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.086>
4. *Yan H., Xiong W., Wang L. et al.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. P. 2257.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.049>
5. *Hubkowska K., Soszko M., Krajewski M. et al.* // Electrochem. Commun. 2019. V. 100. P. 100.  
<https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.02.007>
6. *Lodziana Z., Debski A., Cios G. et al.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44. P. 1760.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.10>
7. *Tai S., Jie H., De M. et al.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43. P. 17318.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.086>
8. *Wei T.Y., Lim K.L., Tseng Y.S. et al.* // Renew. Sustain. Energy Rev. 2017. V. 79. P. 1122.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.132>
9. *Liu J., Zheng Z., Cheng H. et al.* // J. Alloys Compd. 2018. V. 731. P. 172.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.042>
10. *Dytek M., Nowak M., Jurczyk M. et al.* // J. Alloys Compd. 2019. V. 780. P. 697.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.196>
11. *Zhang Y., Li Y., Shang H. et al.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43. P. 1643.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.112>
12. *Бурнашева В.В., Тарасов Б.П., Семенов К.Н.* // Журн. неорганической химии. 1982. Т. 27. № 12. С. 3039.
13. *Ben Belgacem Y., Khaldi C., Lamloumi J.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. P. 12797.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.143>
14. *Liu W., Webb C.J., Gray E. MacA.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. P. 3485.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.054>
15. *Xin G., Yuan H., Yang K. et al.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. P. 21261.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.259>
16. *Yartys V., Denys R.* // J. Alloys Compd. 2015. V. 645. P. 412.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.091>
17. *Сон В.Б., Шимкус Ю.Я., Тарасов Б.П. и др.* // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология". 2015. № 21. С. 100.  
<https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.21.011>
18. *Son V.B., Volodin A.A., Tarasov B.P. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2016. V. 65. № 8. P. 1971. [*Сон В.Б., Володин А.А., Тарасов Б.П. и др.* // Изв. АН. Сер. хим. 2016. № 8. С. 1971.]  
<https://doi.org/10.1007/s11172-016-1538-1>
19. *Fokin V.N., Fursikov P.V., Fokina E.E. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 9. P. 1081. [*Фокин В.Н., Фурсиков П.В., Фокина Э.Э. и др.* // Журн. неорганической химии. 2019. Т. 64. № 9. С. 909.  
<https://doi.org/10.1134/S0036023619090122>
20. *Fokin V.N., Fokina E.E., Tarasov B.P.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. V. 63. № 12. P. 1605. [*Фокин В.Н., Фокина Э.Э., Тарасов Б.П.* // Журн. неорганической химии. 2018. Т. 63. № 12. С. 1589.]  
<https://doi.org/10.1134/S0036023618120082>
21. *Hassen J., Luc A., Walid D. et al.* // J. Solid State Chem. 2018. V. 260. P. 73.  
<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.01.015>
22. *Zhang L., Wang J., Du W. et al.* // J. Alloys Compd. 2015. V. 653. P. 498.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.049>
23. *Ouyang L., Huang J., Wang H. et al.* // Mater. Chem. Phys. 2017. V. 200. P. 164.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.07.002>
24. *Volodin A.A., Denys R.V., Tsirlina G.A. et al.* // J. Alloys Compd. 2015. V. 645. P. 288.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.201>
25. *Volodin A.A., Wan ChuBin, Denys R.V. et al.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. P. 9954.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.089>
26. *Lan Z., Li J., Wei B. et al.* // J. Rare Earths. 2016. V. 34. № 4. P. 401.  
[https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60040-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60040-6)
27. *Cai X., Wei F., Xu X. et al.* // J. Rare Earths. 2016. V. 34. № 12. P. 1235.  
[https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60159-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60159-X)
28. *Zhang L., Han S., Li Y., Liu J.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2013. V. 38. P. 10431.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.129>
29. *Kohta A., Yoshiaki I., Masuo O.* // J. Alloys Compd. 2005. V. 389. P. 215.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.05.081>