



## Оригинальные статьи

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3118>

Поступила в редакцию 26.09.2020

Принята к публикации 15.10.2020

Опубликована онлайн 25.12.2020

ISSN 1606-867X

eISSN 2687-0711

УДК 541.13:615.4

## Оценка диффузионно-кинетических и термодинамических характеристик Al-Sm-H сплавов

© 2020 В. О. Лукьянова<sup>✉</sup>, И. Ю. Гоц

Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина,  
ул. Политехническая, 77, Саратов 410054, Российская Федерация

### Аннотация

Металлогидридные системы хранения водорода в настоящее время выпускаются промышленностью, и спрос на них постоянно растет. Его характеризует уникальное сочетание свойств систем металл-водород, возможность достижения экстремально высоких объемных плотностей атомов водорода в матрице металла, широкий диапазон рабочих давлений и температур, избирательность процесса поглощения водорода, значительные изменения физических свойств металла при его насыщении водородом, каталитическая активность и ряд других особенностей. Целью настоящей работы является исследование температуры катодной поляризации на диффузионно-кинетические, термодинамические и физические свойства Al-Sm-H сплавов.

В данной работе в качестве образцов использовались электроды Al-Sm-H сплавов, полученные электрохимическим способом по методу катодного внедрения в 0.5 М растворе салицилата самария в диметилформамиде при  $E_{\text{кп}} = -2.9$  В (относительно неводного хлорсеребряного электрода) и температуре 25 °С в течение 1 часа. Методом электродвижущих сил определялись термодинамические характеристики: свободная энергия Гиббса ( $\Delta G$ ), энтропия ( $\Delta S$ ), энтальпия ( $\Delta H$ ). Потенциостатический метод позволил рассчитать диффузионно-кинетические характеристики: константы внедрения, адсорбцию, а также плотность тока в момент включения и коэффициент диффузии. Микроструктурный анализ позволил установить влияние температуры на изменения морфологии поверхности.

Установлено, что значения  $\Delta G$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta H$  возрастают с увеличением температуры, что свидетельствует о повышении доли разупорядочения системы с ростом температуры. Тем не менее, рассчитанные характеристики хорошо согласуются с литературными данными.

**Ключевые слова:** метод электродвижущих сил, редкоземельные элементы, алюминиевая матрица, водород, потенциостатический метод, микроструктура, диффузионно-кинетические характеристики.

**Источник финансирования:** Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 20-33-90150).

**Для цитирования:** Лукьянова В. О., Гоц И. Ю. Оценка диффузионно-кинетических и термодинамических характеристик Al-Sm-H сплавов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(4): 481–488. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3118>

**For citation:** Lukyanova V. O., Gots I. Yu. Estimation of diffusion-kinetic and thermodynamic properties of Al-Sm-H alloys. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2020;22(4): 481–488. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3118>

✉ Лукьянова Виктория Олеговна, e-mail: [lukyanova.viky@yandex.ru](mailto:lukyanova.viky@yandex.ru)



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Ежегодное истощение ископаемых органических топлив в сочетании с глобальными экологическими проблемами обуславливает поиск альтернативных возобновляемых, экологически чистых источников, способных обеспечить человечество устойчивыми поставками на ближайшие сотни лет [1]. При современном уровне знаний среди альтернативных источников энергии выделяется водород [2–9]. Развитие водородных технологий и разработка топливных элементов позволяет говорить об перспективах использования водорода в качестве топлива при создании автономных мобильных и стационарных источников энергии. Компактное и безопасное хранение водорода является очень важной проблемой, от решения которой зависит успешная реализация концепции водородной энергетики.

Эти особенности определили и основные области практического применения гидридов интерметаллических соединений [10–15]: стационарное хранение водорода, мобильное хранение и транспорт водорода, гидридные компрессоры, геттеры водорода, отделение и очистка водорода, разделение изотопов водорода, тепловые насосы и рефрижераторы, гидридное диспергирование.

Металлогидридные системы хранения водорода в настоящее время выпускаются промышленностью, и спрос на них медленно, но неуклонно растет [16–20]. Его характеризует уникальное сочетание свойств систем металл-водород, возможность достижения экстремально высоких объемных плотностей атомов водорода в матрице металла, широкий диапазон рабочих давлений и температур, избирательность процесса поглощения водорода, значительные изменения физических свойств металла при его насыщении водородом, каталитическая активность и ряд других особенностей.

Благодаря технологической гибкости, высокой компактности, безопасности и не высоким энергозатратам, металлогидридный метод хранения водорода имеет хорошие перспективы для создания эффективных комбинированных систем хранения водорода.

Одно из перспективных направлений в области водородной энергетики – применение алюмогидридов, поскольку они обладают высокой объемной, а также массовой плотностью [21–23].

Целью настоящей работы является исследование влияния температуры катодной поляризации на диффузионно-кинетические и физические свойства Al-Sm-H сплавов.

## 2. Экспериментальная часть

Матрица Al-Sm сплава была получена на тонких фольговых алюминиевых электродах (99.99) (по ГОСТ 11069-74) электрохимическим способом по методу катодного внедрения [24] в 0.5 М растворе салицилата самария в диметилформамиде (ДМФ) при  $E_{\text{кп}} = -2.9$  В (относительно неводного хлорсеребряного электрода) и температуре 25 °С в течение 1 часа. Затем Al-Sm-H электроды получали импульсным потенциостатическим методом при  $E_{\text{кп}} = -1.6$  В в течение 30 минут из смеси ДМФ : H<sub>2</sub>O при объемном соотношении (7 : 3) и температуре 25 °С, длительность начального короткого импульса составляла 800 миллисекунд.

Для определения диффузионно-кинетических характеристик применялся потенциостатический метод. Исследования проводили в потенциостатическом режиме при потенциале катодной поляризации  $-E_{\text{кп}} = 1.6$  В в течение получаса в области температур от 303.15 до 333.15 К, с помощью потенциостата Р-20Х фирмы Electrochemical Instruments (Россия) в комплекте с прилагаемой к нему компьютерной программой. Температура поддерживалась с помощью термостата ВТ8-2 фирмы Termex (Россия) с точностью  $\pm 0.1$  °С.

Внедрение водорода в сформированный ранее AlSm-сплав на алюминиевом электроде, характеризующие скорость электрохимической стадии разряда, сопровождающейся образованием фазы внедрения Al-Sm-H, происходило, предположительно, по реакции (1):



Диффузионно-кинетические характеристики рассчитывались по методике, описанной в статьях [25–27].

Количество экстрагируемого водорода находили интегрированием  $i-t$  кривой за вычетом количества электричества [28], полученного умножением остаточного тока на время экстракции ( $t_0$ ):

$$Q'_H = \int idt - i_\phi t_0, \quad (2)$$

где  $Q'_H$  – количество электричества, затраченное на окисление экстрагированного водорода,  $i_\phi$  – остаточный ток.

Окончательное количество электричества ( $Q_H$ ), соответствующее водороду, поглощенному единицей поверхности покрытия при химическом осаждении, получали по уравнению (3):

$$Q_H = Q'_H / S, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь рабочей поверхности электрода в ходе экстракции.

Информацию о процессах при разряде исследуемого электрода можно получить на основе изучения изменения термодинамических характеристик в системе при протекании реакции (4), (5), (6):

$$\Delta G(x, T)_p = -E_p \cdot F, \quad (4)$$

$$\Delta S(x, T)_p = F \left( \frac{dE}{dT} \right)_p, \quad (5)$$

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S. \quad (6)$$

Из зависимости  $i - 1/T$  была определена энергия активации по уравнению (7):

$$A = -2,3R \left[ \frac{a \lg i}{\Delta(1/T)} \right]_n = -2,3R \left[ \frac{\lg i_2 - \lg i_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \right]_n, \quad (7).$$

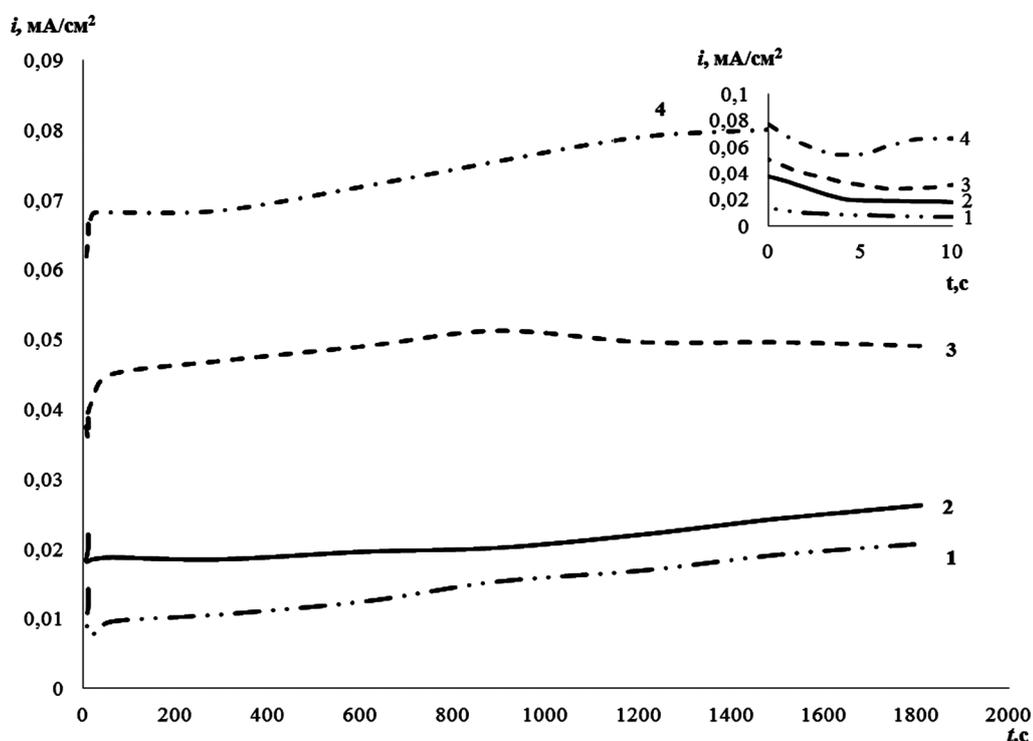
Для контроля и визуализации данных о линейных размерах микрообъектов, форме микрочастиц и создания архива изображений микрообъектов был использован анализатор изображения микроструктур АППМ-6М ФУЛК 401163.001-01. Определение пористости производилось с использованием программы «Микрошлиф».

### 3. Результаты и обсуждение

Потенциостатический метода показал, что на начальном этапе образования гидридного слоя в Al-Sm электроде зависимость  $i-t$  (рис. 1) линейна в координатах  $i - 1/\sqrt{t}$  (рис. 2б), что указывает на лимитирующую стадию диффузии водорода в Al-Sm сплав при заданном значении потенциала и температуры.

Через 0.5–10 секунд спад тока (рис. 2а и б) резко замедляется, и начинается образование и последующий рост зародышей новой фазы, что приводит к возникновению сплошного гидридного слоя. Примерно через 20 минут плотность тока  $i$  на электроде практически перестает изменяться во времени, и рост гидридного слоя происходит за счет химического взаимодействия водорода с элементами Al-Sm сплава (табл. 1). Величина установившегося стационарного тока  $i_{\text{стац}}$  растет при смещении потенциала катодной поляризации в область более отрицательных значений.

Исследования диффузионно-кинетических характеристик электрохимического внедрения водорода в Al-Sm сплав при различных потенциалах катодной поляризации проводили в импульсном потенциостатическом режиме при  $E_{\text{кп}} = -1.6$  В в течение 30 мин, длительность начального импульса  $\tau = 1$  с.



**Рис. 1.** Влияние температуры на ход  $i, t$  – кривых при сорбции водорода Al-Sm сплава в водно-органическом электролите ( $V_{\text{H}_2\text{O}} : V_{\text{ДМФ}}$ ) 7 : 3 в течение 30 минут при потенциале катодной поляризации  $-E_{\text{кп}} = 1.6$  В и температурах: 1 – 303.15; 2 – 313.15; 3 – 323.15; 4 – 333.15 К

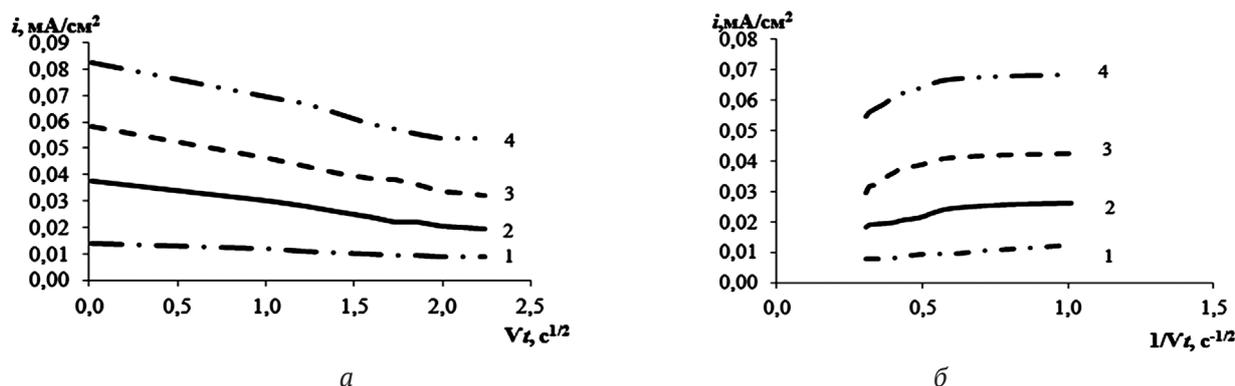


Рис. 2. Кривые зависимости  $i-\sqrt{t}$  (а) и  $i-1/\sqrt{t}$  (б) сорбции водорода Al-Sm сплава в водно-органическом электролите ( $V_{\text{H}_2\text{O}} : V_{\text{ДМФ}}$ ) 7 : 3 в течение 30 минут при потенциале катодной поляризации  $-E_{\text{кп}} = 1.6$  В и температурах: 1 – 303.15; 2 – 313.15; 3 – 323.15; 4 – 333.15 К

Таблица 1. Влияние температуры на процесс зародышеобразования на Al-Sm-H-электрод

Температура (Т), К	Количество электричества ( $Q \cdot 10^5$ ), А·с/см <sup>2</sup>	Число зародышей ( $N \cdot 10^{-11}$ )	Масса зародыша ( $m \cdot 10^{-18}$ ), г	Радиус зародыша (r), нм
303.15	2.43	10.72	0.21	1.53
313.15	5.46	2.13	2.24	3.43
323.15	7.52	1.19	6.18	4.73
333.15	10.22	0.61	15.52	6.32

Анализ зависимости  $i-t$  кривых (рис. 1) внедрения водорода в Al-Sm сплав в координатах  $i-\sqrt{t}$  (рис. 2а),  $i-1/\sqrt{t}$  (рис. 2б) позволил рассчитать константу внедрения  $K_b$ ,  $C_0\sqrt{D}$ , ток в момент включения  $i_{(t=0)}$ .

Расчитанные диффузионно-кинетические характеристики представлены в табл. 2.

Двухкомпонентная система Al-Sm, состоящая из гидридообразующего металла (алюминий) и катализатора гидридообразования редкоземельного элемента (РЗЭ), допускает частичную замену одних элементов другими, вследствие взаимодействия металлов с образованием интерметаллических соединений смягчаются условия образования гидридов. Десорбция водорода из алюмогидридов состава  $\text{MAlH}_4$  (где

$M = \text{Li, Na, K, РЗЭ}$ ), происходит в несколько стадий путем химического разложения, при этом выделяется около 2 масс. % водорода [29]. Это приводит к изменению скорости взаимодействия с водородом.

Согласно результатам табл. 2 скорость процесса сорбции водорода алюминий-самариевой матрицей растет с увеличением температуры. Об этом свидетельствуют диффузионно-кинетические характеристики: константа внедрения  $K_b$  и  $C_0\sqrt{D}$  возрастают, примерно, в 2.0 раза, адсорбция  $\Gamma$  и плотность тока в момент включения  $i_{(t=0)}$  почти в 2.1 раз, а коэффициент диффузии  $D$  в 1.27 раз.

Значения термодинамических характеристик сформированных структур, определяемых

Таблица 2. Диффузионно-кинетические характеристики Al-Sm сплава

Температура (Т), К	Константа внедрения ( $K_b \cdot 10^5$ ), А·см <sup>2</sup> /с <sup>1/2</sup>	Диффузионная составляющая ( $C_0\sqrt{D} \cdot 10^{10}$ ), моль/см <sup>2</sup> ·с <sup>-1/2</sup>	Плотность стационарного тока ( $i_{(t=0)}$ ), мА/см <sup>2</sup>	Величина адсорбции ( $\Gamma \cdot 10^6$ ), моль/см <sup>2</sup>	Химический коэффициент диффузии внедряющихся частиц ( $D \cdot 10^{12}$ ) см <sup>2</sup> /с
303.15	6.444	1.182	0.061	0.842	2.64
313.15	8.527	1.564	0.073	0.961	3.06
323.15	9.882	1.813	0.084	1.283	3.36
333.15	13.011	2.386	0.133	2.351	3.54

методом электродвижущих сил (ЭДС), рассчитывали из значений стационарного потенциала. Термодинамические характеристики образования гидридов в алюминий-самариевом сплаве представлены в табл. 3

Энергия активации по (4) составляет 39.755 кДж/моль. Это указывает на то, что процесс лимитируется стадией разряда или химической реакцией.

Согласно данным табл. 2 значения  $\Delta G$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta H$  увеличиваются с ростом температуры, что свидетельствует о возрастании доли разупорядочения системы с ростом температуры. Рассчитанные характеристики хорошо согласуются с литературными данными. Средние значения  $\Delta G = -34.412$  кДж/моль и  $\Delta H = -44.040$  кДж/моль показывают, что система термодинамически стабильна и будет работать в широком диапазоне температур.

Полученные данные  $E_{H_2} - T$  в табл. 3 могут свидетельствовать о процессах, протекающих в твердой фазе активного вещества, и структурных преобразованиях в электроде Al-Sm-H при внедрении водорода. Согласно полученным экспериментальным данным на все протекающие процессы влияет температура. С повышением температуры происходит более глубокое внедрение водорода.

Учитывая расчетные данные, температурный коэффициент имеет положительное значение. Соотношение между  $\Delta G$  и  $\Delta H$  определяет знак температурного коэффициента и позволяет оценить тепловой эффект и характер реакции, протекающий в системе [28], а также рассчитать изменение энтропии, являющейся мерой упорядоченности в системе, связанной с совокупностью всех взаимодействий между её частицами и со строением вещества [30].

При положительном коэффициенте  $\Delta E/\Delta T$  процесс является эндотермическим. По условиям термодинамики в этом случае работа элект-

рического тока становится больше теплового эффекта реакции, а процессы в системе протекают с дополнительными энергетическими затратами. При этом за счет внедрения водорода происходит значительное изменение параметров структуры формирующихся соединений.

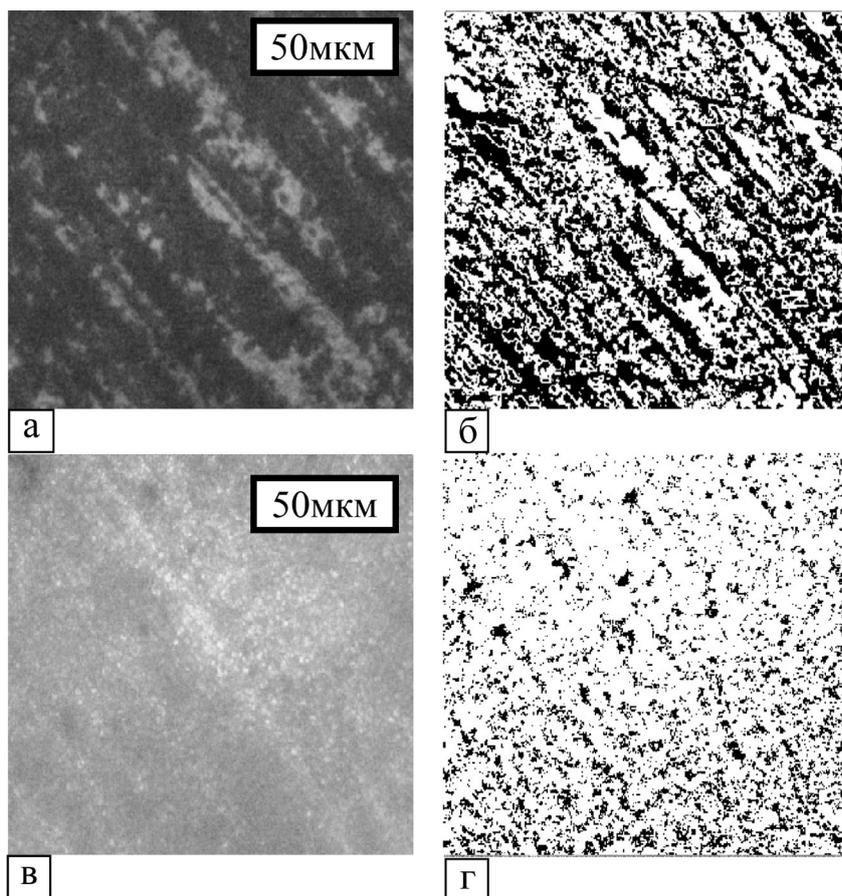
Изучение изображений поверхности (рис. 3 и табл. 4) позволило выявить наличие на поверхности образцов образования округлой формы на всех изображениях данной серии образцов. Механизм преобразования структуры поверхности образцов, вероятнее всего, связан с ростом и слиянием подобных образований.

В дальнейшем была показана возможность применения электрохимического метода определения количества водорода, абсорбированного при катодной поляризации Al-Sm сплава, полученного по методу катодного внедрения.

Анализ зависимости  $i-t$  кривых в координатах  $i-\sqrt{t}$  и  $i-1/\sqrt{t}$  показал, что сорбция водорода Al-Sm сплавом связана с протеканием двух параллельных процессов: внедрения водорода в сформированный ранее Al-Sm сплав на алюминиевом электроде и образования новой фазы внедрения Al-Sm-H. Градиент концентрации по водороду  $dc/dx$  имеет достаточно высокое значение для обеспечения процесса диффузии, необходимого для протекания реакции. Образование гидридов на Al-Sm электроде по методу катодного внедрения происходит в несколько этапов, которые различаются по кинетике и по природе фаз. На первом этапе происходит образование твердого раствора водорода в Al-Sm. На этом участке наблюдается постепенный спад тока во времени, который отвечает случаю лимитирования процесса диффузией, так как экстраполируется в начало координат. На втором этапе происходит образование зародышей кристаллов интерметаллических соединений водорода с Al и водорода с Sm и их последующий рост, который приводит к возникновению сплошного слоя

**Таблица 3.** Термодинамические характеристики образования гидридов в Al-Sm-H сплаве

Температура (T), К	Стандартный электродный потенциал ( $-E_{ст. (H_2)}$ ), В	Температурный коэффициент ( $\Delta E/\Delta T \cdot 10^{-4}$ ), В/К	Среднее значение температурного коэффициента ( $\Delta E/\Delta T \cdot 10^{-4}$ ), В/К	Стандартный электродный потенциал ( $-E_{H_2}$ ), В	Свободная энергия Гиббса ( $-\Delta G$ ), кДж/моль	Энтропия ( $\Delta S$ ), Дж/моль К	Энтальпия ( $-\Delta H$ ), кДж/моль
303.15	0.576	2.8	2. 286	0.353	34.103	27.016	42.284
313.15	0.579	2.9		0.356	34.382	27.981	43.114
323.15	0.582	3.1		0.359	34.644	29.911	47.241
333.15	0.585	3.2		0.362	34.962	30.876	45.551



**Рис. 3.** Микроструктура поверхности Al-Sm-N и ее преобразование в бинарное (черно-белое) с помощью программы «Микрошлиф» (при  $T = 303.15\text{K}$  (а, б) и  $T = 313.15\text{K}$  (в, г))

**Таблица 4.** Значения величины пористости поверхностных слоев сформированных сплавов системы Al-Sm-N

№ п/п	1	2	3	4
Температура, К	303.15	313.15	323.15	333.15
Пористость, %	49	16	17	46

бинарных гидридов, соответствующих металлов. На третьем – рост слоя гидридов соответствующих металлов за счет химического взаимодействия растворенного водорода в сплаве алюминия с самарием. Для случая медленной химической реакции образования интерметаллического соединения на границе металл/интерметаллид характерна линейная зависимость скорости процесса от потенциала

#### 4. Выводы

Проведена оценка диффузионно-кинетических и термодинамических характеристик Al-Sm электрода. Показано, что увеличение температуры электролита приводит к росту диффузионно-кинетических характеристик, а именно константы скорости, плотности тока в момент вклю-

чения, скорости диффузии и величины адсорбции водорода.

Анализ потенциостатических кривых в различных координатах указывает, что процесс диффузии сопровождается параллельным процессом роста гидридного слоя, который происходит за счет химического взаимодействия водорода с элементами Al-Sm сплава. Скорость процесса сорбции водорода алюминий-самариевой матрицей возрастает с увеличением температуры. Об этом свидетельствуют диффузионно-кинетические характеристики: константа внедрения  $K_v$  и  $C_0\sqrt{D}$  возрастают, примерно, в 2 раза, адсорбция  $\Gamma$  и плотность тока в момент включения  $i_{(t=0)}$ , почти в 2.1 раз, а коэффициент диффузии  $D$  в 1.27 раз. Значения  $\Delta G$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta H$  возрастают с увеличением температуры, что свидетельствует

о повышении доли разупорядочения системы с ростом температуры. Тем не менее, рассчитанные характеристики хорошо согласуются с литературными данными.

Наибольшей дисперсностью обладают образцы, полученные при температуре 313.15 К. Видно, что при температурах 313.5–323.15 К пористость минимальна. Однако при 323.15 К уже начинают появляться точки пробы, которые отчетливо становятся, выражены при 333.15 К.

### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-33-90150.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы

1. Фатеев В. Н., Алексеева О. К., Коробцев С. В., Серегина Е. А., Фатеева Т. В., Григорьев А. С., Алиев А. Ш. Проблемы аккумуляирования и хранения водорода. *Chemical Problems*. 2018;16(4): 453–483. DOI: <https://doi.org/10.32737/2221-8688-2018-4-453-483>
2. Kaur M., Pal K. Review on hydrogen storage materials and methods from an electrochemical viewpoint. *Journal of Energy Storage*. 2019;23: 234–249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.020>
3. Kumar D., Muthukumar K. An overview on activation of aluminium-water reaction for enhanced hydrogen production. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;835: 155189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155189>
4. Litvinov V., Okseniuk I., Shevchenko D., Bobkov V. SIMS study of the surface of lanthanum-based alloys. *Ukrainian Journal of Physics*. 2018;62(10): 845. DOI: <https://doi.org/10.15407/ujpe62.10.0845>
5. Schneemann A., White J. L., Kang S., Jeong S., Wan L. F., Cho E. S., Heo T. W., Prendergast D., Urban J. J., Wood B. C., Allendorf M. D., Stavila V. Nanostructured metal hydrides for hydrogen storage. *Chemical Reviews*. 2018;118(22): 10775–10839. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00313>
6. Wang Y., Chen X., Zhang H., Xia G., Sun D., Yu X. Heterostructures built in metal hydrides for advanced hydrogen storage reversibility. *Advanced Materials*. 2020;32(31): 2002647. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202002647>
7. von Colbe J. B., Ares J. R., Barale J., Baricco M., Buckley C., Capurso G., Gallandate N., Grant D. M., Guzik M. N.; Jacob I., Jensen E. H., Jensen T., Jepsen J., Klassen T., Lototsky M. V., Manickam K., Montone A., Puszkiel J., Sartori S., Sheppard D. A., Stuart A., Walker G., Webb C. J., Yang H., Yartys V., Züttel A., Dornheim M. Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(15): 7780–7808. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.104>
8. Milanese C., Jensen T. R., Hauback B. C., Pistida C., Dornheim M., Yang H., Lombardo L., Züttel A., Filinchuk Y., Ngene P., de Jongh P. E., Buckley C. E., Dematteis E. M., Baricco M. Complex hydrides for energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(15): 7860–7874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.208>
9. Abe J. O., Popoola A. P. I., Ajenifuja E., Popoola O. M. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(29): 15072–15086. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
10. He T., Cao H., Chen P. Complex hydrides for energy storage, conversion, and utilization. *Advanced Materials*. 2019;31(50): 1902757. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201902757>
11. Luo Y., Wang Q., Li J., Xu F., Sun L., Zou Y., Chua H., Li B., Zhang K. Enhanced hydrogen storage/sensing of metal hydrides by nanomodification. *Materials Today Nano*. 2020;9: 100071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2019.100071>
12. Gambini M., Stilo T., Vellini M. Hydrogen storage systems for fuel cells: Comparison between high and low-temperature metal hydrides. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(29): 15118–15134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.083>
13. Kim, K. C. A review on design strategies for metal hydrides with enhanced reaction thermodynamics for hydrogen storage applications. *International Journal of Energy Research*. 2018;42(4): 1455–1468. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3919>
14. Oliveira A. C., Pavão A. C. Theoretical study of hydrogen storage in metal hydrides. *Journal of Molecular Modelling*. 2018;24(6): 127. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00894-018-3661-4>
15. Møller K. T., Sheppard D., Ravnsbæk D. B., Buckley C. E., Akiba E., Li H. W., Jensen T. R. Complex metal hydrides for hydrogen, thermal and electrochemical energy storage. *Energies*. 2017;10(10): 1645. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10101645>
16. Huot J., Cuevas F., Deledda S., Edalati K., Filinchuk Y., Grosdidier T., Hauback B. C., Heere M., Jensen T. R., Latroch M., Sartori S. Mechanochemistry of metal hydrides: Recent advances. *Materials*. 2019;12(17): 2778. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12172778>
17. Tarasov B. P., Fursikov P. V., Volodin A. A., Borcharnikov M. S., Shimkus Y. Y., Kashin A. M., Yartys V. A., Chidzivad S., Pasupathid S., Lotot-

skyy M. V. Metal hydride hydrogen storage and compression systems for energy storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.085>

18. Zhao H., Xia J., Yin D., Luo M., Yan C., Du Y. Rare earth incorporated electrode materials for advanced energy storage. *Coordination Chemistry Reviews*. 2019;390: 32–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.03.011>

19. Guzik M. N., Mohtadi R., Sartori S. Lightweight complex metal hydrides for Li-, Na-, and Mg-based batteries. *Journal of Materials Research*. 2019;34(6): 877–904. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.82>

20. Edward P. P., Kuznetsov V. L., David W. I. F. (2007). Hydrogen energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007;365(1853): 1043–1056. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1965>

21. Weidenthaler C. Crystal structure evolution of complex metal aluminum hydrides upon hydrogen release. *Journal of Energy Chemistry*. 2020;42: 133–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.05.026>

22. Kunkel N., Wylezich T. Recent advances in rare earth-doped hydrides. *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*. 2019;645(3): 137–145. DOI: <https://doi.org/10.1002/zaac.201800408>

23. Milanese C., Garroni S., Gennari F., Marini A., Klassen T., Dornheim M., Pistidda, C. Solid state hydrogen storage in alanates and alanate-based compounds: A review. *Metals*. 2018;8(8): 567. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8080567>

24. Гоц И.Ю., Лукьянова В.О. Влияние добавки редкоземельного металла на прочностные характеристики алюминиевых электродов. Перспективные материалы. 2020;2: 39–47. DOI: <https://doi.org/10.30791/1028-978x-2020-2-39-47>

25. Крапивный Н. Г. Определение кинетических параметров стадии проникновения водорода в металлы нестационарным электрохимическим методом. *Электрохимия*. 1981;17(5): 672–677.

26. Крапивный Н. Г. Применение электрохимической экстракции для изучения наводороживания металлов. *Электрохимия*. 1982;18 (9): 1174–1178.

27. Придатко К. И., Чуриков А. В., Волгин М. А. Определение скорости диффузии лития импульсным потенциостатическим методом. *Электрохимическая энергетика*. 2003;3(4): 184–191. Режим доступа: <https://energetica.sgu.ru/ru/articles/opredelenie-skorosti-diffuzii-litiya-impulsnym-potenciostaticheskim-metodom>

28. Ольшанская Л. Н., Терина Е. М., Ничволодин А. Г. Термодинамические характеристики интеркалатов лития в  $C_8CrO_3$  электроде, модифицированном добавками графитизированной сажи. *Электрохимическая энергетика*. 2001;1(4): 49–53. Режим доступа: <https://energetica.sgu.ru/ru/articles/termodinamicheskie-harakteristiki-interkalatov-litiya-v-s8cro3-elektrode-modificirovannom>

29. Патрикеев Ю. Б., Филянд Ю. М. Сплавы-накопители водорода на основе РЗЭ для энергопреобразующих устройств. *Альтернативная энергетика и экология*. 2006;7: 32. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9428372>

30. Головин П. В., Медведева Н. А., Скрыбина Н. Е. Катодное поведение сплавов на основе титана в реакции выделения водорода. *Вестник Казанского технологического университета*. 2012;15(17): 58–61. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18125773>

### Информация об авторах

Лукьянова Виктория Олеговна, аспирант кафедры «Химия и химическая технология материалов», Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, Саратов, Российская Федерация; e-mail: [lukyjanova.viky@yandex.ru](mailto:lukyjanova.viky@yandex.ru). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4656-3573>.

Гоц Ирина Юрьевна, к. х. н., доцент, доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия», Саратов, Российская Федерация; e-mail: [gozt2001@mail.ru](mailto:gozt2001@mail.ru). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5839-301X>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.