



УДК 541.136.136.88

## Сорбционные и термодинамические характеристики алюминиевых электродов, модифицированных европием в широком интервале температур

© 2021 Лукьянова В.О., Гоц И.Ю.

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов*

Поступила в редакцию 05.07.2021 г.

DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3774

В работе проведено исследование влияния температуры на процесс сорбции водорода в алюминиевый сплав, легированный европием. Алюминиевые электроды были модифицированы методом катодного внедрения. В начале производилось внедрение европия из 0.5 mol раствора салицилата европия в диметилформамиде (ДМФ) при потенциале катодной поляризации – 2.9 В относительно неводного хлорсеребряного электрода (н.х.с.э.) при температуре 25°C, далее в готовый алюминий-европиевый электрод внедрялся водород из водно-органического электролита (диметилформамид и воды, в соотношении) (7:3) при температурах: 253.15; 263.15; 273.15; 283.15; 293.15; 303.15; 313.15; 323.15 К. В ходе эксперимента из потенциостатических кривых были рассчитаны диффузионно-кинетические характеристики сорбции водорода при электролизе такие, как константа внедрения, концентрация внедрившихся в матрицу атомов, коэффициент диффузии, и значение адсорбции, а также выявлено влияние температуры катодного внедрения на процесс зародышеобразования и термодинамические характеристики полученных электродов. Методом электродвижущей силы определялись термодинамические характеристики: свободная энергия Гиббса ( $\Delta G$ ), энтропия ( $\Delta S$ ), энтальпия ( $\Delta H$ ) и энергия активации. Значения  $\Delta G$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta H$  возрастают с увеличением температуры, что свидетельствует о повышении доли разупорядочения системы с ростом температуры. Анализ потенциостатических кривых в различных координатах указывает, что процесс диффузии водорода сопровождается параллельным процессом роста гидридного слоя, который происходит за счет химического взаимодействия водорода с элементами Al-Eu сплава.

**Ключевые слова:** ЭДС, РЗЭ, алюминиевая матрица, водород, потенциостатический метод, микроструктура, диффузионно-кинетические характеристики.

### Введение

Алюминий – металл, широко используемый в металлургии для различных применений в транспортировке, упаковке и строительстве. Сам по себе алюминий демонстрирует довольно плохие механические свойства, но их можно значительно улучшить, легируя алюминий другими элементами, такими как Li, Cu, Mn, Mg или Si.

Водород – единственный газ, растворимый в алюминии и его сплавах. Количество водорода, поглощенного путем сольубилизации в жидкой фазе в алюми-

ниевом сплаве, остается низким, порядка 10-4 ат.% H. Он может растворяться как в твердой, так и в жидкой фазе в соответствии с законом Сивертса. Растворимость в твердой фазе систематически ниже, чем в жидкой фазе. Следовательно, при затвердевании большая часть атомарного водорода, растворенного в жидкой фазе, рекомбинирует в газообразной форме в твердом теле, образуя пузырьки в сплавах. Наличие легирующих элементов влияет на растворимость и способствует наличию структурных дефектов, что увеличивает растворимость. Отмечено, что в жидкой фазе

элементы, которые имеют сильное сродство с водородом (Mg, Ti, Li и т.д.), имеют тенденцию к увеличению растворимости [1-2]. Напротив, легирующие элементы, такие как Si, Cu или F, которые образуют нестабильные гидриды, уменьшают растворимость водорода в сплаве [3-5].

Известно, что редкоземельные элементы (РЗЭ) образуют очень стабильные гидриды с концентрацией от 2-3 ат.% H в объеме [6-8]. Изучение бинарных диаграмм и энтальпий образования показывает, что некоторые редкие земли, такие как Er, La или Y, образуют твердые гидриды при температурах выше 660°C, то есть температуре затвердевания алюминия. Добавление элемента 4f в алюминий может поэтому иметь два эффекта: изменение растворимости водорода в растворе алюминий-водород и осаждение гидрида редкоземельного элемента в жидкой фазе. О таком явлении уже сообщалось [9] для магния и сплавов Mg-Zn, для которых наблюдалось осаждение гидридов в температурном диапазоне 500-900°C из следующих добавленных растворенных веществ Ca, Y и Th, [10] сообщалось об осаждении ZrH<sub>2</sub> в жидком магнии.

В настоящей работе алюминий, легируемый европием и обогащенный водородом методом катодного внедрения, исследуется в твердой фазе. При помощи потенциостатического метода проводится расчет диффузионно-кинетических значений и оценка термодинамических характеристик методом электродвижущих сил. Анализ потенциодинамических кривых позволил рассчитать количество внедренного водорода и оценить сорбционные свойства алюминиевого сплава.

### Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования использовались тонкие фольговые алюминиевые электроды (99.99) (по ГОСТ 11069-74) модифицированные европием электрохимическим способом по методу катодного внедрения [11] в 0.5 М рас-

творе салицилата европия в диметилформамиде (ДМФ) при  $E_{кпл} = -2.9$  В (относительно неводного хлорсеребряного электрода) и температуре 25°C в течение 1 часа. Затем Al-Eu-H электроды получали потенциостатическим методом при  $E_{кпл} = -1.6$  В в течение 30 минут из смеси диметилформамида (ДМФ) и воды при объемном соотношении (7:3) и температуре 253.15 до 323.15 К. Исследования проводили с помощью потенциостата P-20X фирмы *Electrochemical Instruments* (Россия) в комплекте с прилагаемой к нему компьютерной программой. Температура поддерживалась с помощью термостата BT8-2 фирмы *Termex* (Россия) с точностью  $\pm 0.1$ °C.

Для определения диффузионно-кинетических характеристик применялся потенциостатический метод, далее расчет производился по методике, описанной в [12].

Изучение влияния температуры на термодинамические характеристики осуществлялся методом электродвижущей силы методом (ЭДС). Значения  $\Delta G$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta H$  рассчитывали из значений стационарного потенциала [13].

Хроновольтамперометрические измерения анодного окисления водорода проводили в растворе H<sub>2</sub>O и ДМФ (7:3) при  $t = 25$ °C и скорости линейной развертки потенциала 5 мВ/с, которая задавалась с помощью потенциостата P-20X фирмы *Electrochemical Instruments* (Россия). Диапазон исследуемых потенциалов составлял от -2,0В до +1,0В. Количество водорода, находящееся в системе Al-Eu, рассчитывали исходя из проведенных трех параллельных опытов по формуле, представленной в статье [14].

Для оценки морфологии поверхности использовался автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) MIRA 2 LMU, производство фирмы Tescan (Чехия), оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350. Исследования проводились в режиме вакуума порядка  $10^{-2}$  Па.

## Обсуждение результатов

Для установления характера сорбции водорода в Al-Eu электрод были сняты катодные поляризационные кривые и рассчитаны диффузионно-кинетические характеристики, представленные в таблице 1.

Из результатов потенциостатического метода (табл. 1) можно сделать вывод, что при достижении 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-Eu сплава. С увеличением температуры линейно увеличиваются все диффузионно-кинетические характеристики.

Известно [15], что при всех экспериментальных условиях после отключения ячейки на Al-Eu-H электроде зафиксировано медленное смещение потенциала в область менее отрицательных значений, это указывает однозначно на образование на металле электрода продуктов внедрения. При увеличении температуры стационарный потенциал становится более отрицательным.

На основании хронопотенциметрических кривых, построением зависимости равновесного потенциала от температуры (рис 1), был определен температурный коэффициент ( $dE/dT$ ), который составляет  $1.6 \cdot 10^{-4}$  В/К.

Анализ полученных данных в координатах E-T показал, что во всем интервале исследуемых температур температурный коэффициент имеет положительное значение. При положительном температурном коэффициенте  $\Delta E/\Delta T$  процесс является эндотермическим. По условиям термодинамики в этом случае работа электрического 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.

Знак температурного коэффициента определяет соотношение между  $\Delta G$  и  $\Delta H$ , что позволяет оценить тепловой эффект и характер реакции, протекающей в системе, а также рассчитать энтропию, показывающая меру упорядоченности в системе, связанной с совокупностью всех взаимодействий между ее частицами и со строением вещества.

Из зависимости равновесного (E) и изобарно-изотермического ( $\Delta G$ ) потенциалов видно, что увеличение температуры, как было исследовано ранее [15], приводит к росту энергии Гиббса.

Прямолинейный ход кривых в координатах E-T и G-T обусловлен процессами, протекающими в твердой фазе интерметаллического соединения, и

Таблица 1. Диффузионно-кинетические характеристики Al-Eu-H электрода  
Table 1. Diffusion-kinetic properties of the Al-Eu-H electrode

Температура (Т), К	Константа внедрения ( $K_B \cdot 10^6$ ) $A \cdot cm^2 / c^{1/2}$	Диффузионная составляющая ( $C_H \sqrt{D} \cdot 10^{11}$ ), $mol/cm^2 \cdot c^{-1/2}$	Плотность стационарного тока ( $i_{(t=0)}$ ), $mA/cm^2$	Величина адсорбции ( $\Gamma \cdot 10^6$ ), $mol/cm^2$	Химический коэффициент диффузии внедряющихся частиц ( $D \cdot 10^{13}$ ) $cm^2/c$
253.15	0.304	0.557	0.081	0.858	0.131
263.15	3.695	6.777	0.113	0.875	1.511
273.15	5.216	9.567	0.143	0.961	2.069
283.15	5.782	10.606	0.163	1.245	6.838
293.15	6.895	12.647	0.278	3.205	10.644
303.15	10.285	18.865	0.389	4.197	14.706
313.15	16.526	30.313	0.487	4.950	17.951
323.15	22.176	40.675	0.525	5.690	20.081

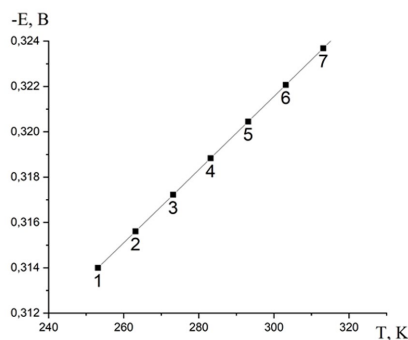


Рис. 1. Зависимость  $E(T)$  для Al-Eu-H электрода в растворах в соотношении 3:7 в течение 30 минут при температурах, К: 1 – 253.15; 2 – 263.15; 3 – 273.15; 4 – 283.15; 5 – 293.15; 6 – 303.15; 7 – 313.15; 8 – 323.15.

Fig. 1. Dependence of  $E$  on  $T$  for the Al-Eu-H electrode in solutions with water and DMF in 3:7 ratio for 30 min at temperatures, K: 1 – 253.15; 2 – 263.15; 3 – 273.15; 4 – 283.15; 5 – 293.15; 6 – 303.15; 7 – 313.15; 8 – 323.15

структурными преобразованиями в Al-Eu-H электроде на которые, согласно полученным экспериментальным данным, оказывает влияние температура. Как известно [16] редкоземельные элементы имеют низкую растворимость в алюминии, при этом образуются несколько интерметаллических соединений с водородом типа  $AB_5$  ( $A$  – РЗМ;  $B$  – 3d-переходный металл). Как видно, по результату морфологических исследований на поверхности образуются включения округлой формы, содержащие алю-

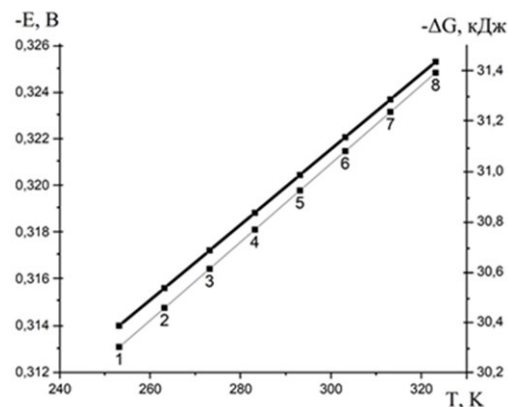


Рис. 2. Зависимости равновесного ( $E$ ) и изобарно-изотермического ( $G$ ) потенциалов для Al-Eu-H электрода в растворах в соотношении 3:7 в течение 30 минут при температурах, К: 1 – 253.15; 2 – 263.15; 3 – 273.15; 4 – 283.15; 5 – 293.15; 6 – 303.15; 7 – 313.15; 8 – 323.15.

Fig. 2. Dependences of the equilibrium ( $E$ ) and isobaric-isothermal ( $G$ ) potentials for the Al-Eu-H electrode in solutions of water and DMF in a ratio of 3:7 for 30 min at temperatures, K: 1 – 253.15; 2 – 263.15; 3 – 273.15; 4 – 283.15; 5 – 293.15; 6 – 303.15; 7 – 313.15; 8 – 323.15

миний с европием и водородом (рис. 3).

Энергодисперсионный анализ шаровидных образований белого цвета на рис. 2. показал, что с ростом температуры увеличивается процентное содержание европия (табл. 2). Также были обнаружены изотопы европия, входящие в структуру оксидов, карбидов и гидридов. Их образование связано с процессами взаимодействия РЗЭ и электролита. Такие интерметаллиды небольшого размера распределены в металлической матрице [17].

Таблица 2. Распределение элементного состава сплава Al-E-H

Table 2. Elemental distribution of the Al-Eu-H alloy

Температура (Т), К	Химический состав %			
	С	О	Al	Eu
253.15	41.2	30.4	27.3	1.1
263.15	40.5	31.2	26.1	2.2
273.15	33.6	21.3	41.9	3.2
283.15	33.3	30.3	31.9	4.5
293.15	36.3	21.4	36.1	6.2
303.15	35.6	23.2	30.6	10.6
313.15	34.6	23.1	31.1	11.2
323.15	35.6	22.1	30.1	12.2

Таблица 3. Концентрация сорбированного водорода в Al-Eu сплаве ( $C_H$ ) на единицу геометрической поверхности электрода в зависимости от температуры

Table 3. Concentration of sorbed hydrogen in the Al-Eu alloy ( $C_H$ ) per unit of geometric electrode surface depending on the temperature

Температура (Т), К	Плотность тока насыщения ( $i_H \cdot 10^4$ ), А/м <sup>2</sup>	Концентрация сорбированного водорода ( $C_H \cdot 10^5$ ), моль/см <sup>2</sup>
253.15	0.261	0.095
263.15	0.572	0.216
273.15	0.814	0.302
283.15	3.521	1.291
293.15	12.434	4.583
303.15	21.021	7.761
313.15	21.512	7.931
323.15	130.121	46.631

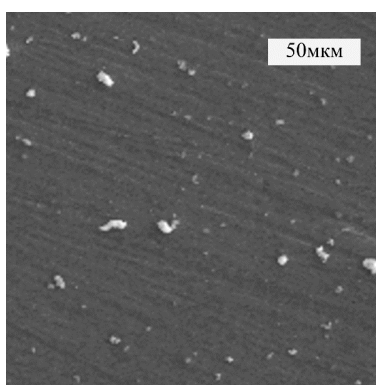


Рис. 3. СЭМ изображение при 500 кратном увеличении поверхности электрода Al-Eu-H, полученного при потенциале -1.6 В в растворе воды и ДМФ в соотношении 3:7 в течение 30 минут при температуре 20°C

Fig. 3. SEM image at a 500x magnification of the surface of an Al-Eu-H electrode obtained at a potential of -1.6 V in a solution of water and DMF in a ratio of 3:7 for 30 minutes at a temperature of 20°C

Как видно из таблицы 3 в зависимости от температуры катодной поляризации можно наблюдать различное количество водорода в сплаве, которое колеблется от  $0.095 \cdot 10^{-5}$  до  $46.631 \cdot 10^{-5}$  моль/см<sup>2</sup> в исследуемой области температур [18].

На основании предыдущих исследований, и известно [16], что сплав Al-Eu состоит гидридообразующего металла (алюминий) и из катализатора гидридообразования (РЗЭ). В связи с этим допускается частичная замена одних элементов другими, вследствие взаимодействия металлов с образованием интерметаллических соединений смягчаются условия образования гидридов. Десорбция водорода из алюмогидридов состава  $MAH_4$  (где  $M=Li, Na, K, PZЭ$ ) происходит в несколько стадий путем химического разложения, при этом выделяется

около 2 масс.% водорода [19-21]. Это приводит к изменению скорости взаимодействия интерметаллического соединения с водородом.

### Заключение

Исследования влияния температуры процесса катодной поляризации на скорость сорбции водорода из водноорганического электролита на Al-Eu электроде показали, что процесс диффузии сопровождается процессом роста гидридного слоя, который происходит за счет химического взаимодействия водорода с элементами Al-Eu сплава. При этом при с увеличением температуры возрастает скорость процесса сорбции водорода алюминий-европий матрицей, что наглядно демонстрируют изменения диффузионно-кинетических характери-

стик в диапазоне температур от 293.15 до 323.15 К: константа внедрения  $K_v$  и  $C_0\sqrt{D}$  возрастает примерно в 3.6 раз, адсорбция  $\Gamma$  и плотность тока в момент включения  $i_{(t=0)}$  почти в 1.85 раз, а коэффициент диффузии  $D$  в 1.87 раз. Значения  $\Delta G$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta H$  возрастают с увеличением температуры, что свидетельствует о повышении доли разупорядочения системы с ростом температуры. При этом система остается термодинамически стабильна и будет работать в диапазоне температур от 253.15 до 323.15 К. Значение

энергии активации составляет 39.755 кДж/моль, указывая на то, что процесс лимитируется стадией разряда или химической реакцией. Полученные данные  $E-T$  могут свидетельствовать о процессах, протекающих в твердой фазе активного вещества, и структурных преобразованиях в электроде Al-Eu-H при внедрении водорода. Рассчитанная концентрация водорода в полученном Al-Eu-H сплаве увеличивается с повышением температуры, что подтверждает более глубокое внедрение водорода.

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

### Список литературы

1. Wang J., Li G., Fu K., Li X. // *Journal of Materials Science*. 2019. Vol. 54. No 20. pp 13334-13343.
2. Hosono H., Kitano M. // *Chemical Reviews*. 2021. Vol. 121. No 5. pp. 3121-3185.
3. Prigent J., Joubert J.M., Latroche M. // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. No 35. pp. 22348-22352.
4. Hirscher M., Yartys V.A., Baricco M., von Colbe. J.B. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. No 827. pp. 153548.
5. Yong H., Guo S., Yuan Z., Qi Y. et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. No 31. pp. 16765-16776.
6. Huot J., Cuevas F., Deledda S., Edalati K. et al. // *Materials*. 2019. Vol. 12. No 17. pp. 2778.
7. Percheron-Guegan A., Lartigue C., Achard J.C. // *Journal of the Less common Metals*. 1985. Vol. 109. No 2. pp. 287-309.
8. Luo Q., Li J., Li B., Liu B. et al. // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2019. Vol. 7. No 1. pp. 58-71.
9. Vargas S.J., Schaeffer N., Souza J.C., da Silva L.H. et al. // *Waste Management*. 2021. No. 125. pp. 154-162.
10. Zhang S., Saji S.E., Yin Z., Zhang H. et al. // *Advanced Materials*. 2021. Vol. 33. No 16. pp. 2005988.
11. Hadjixenophontos E., Dematteis E.M., Berti N., Wołczyk A.R. et al. // *Inorganics*. 2020. Vol. 8. No 3. pp. 17.
12. Fu K., Li G., Li J., Liu. Y. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. No 696. pp. 60-66.
13. Гоц И.Ю., Лукьянова В.О. // *Перспективные материалы*. 2020. № 2. С. 39-47.
14. Ольшанская Л.Н., Данилова Е.А., Кирчева А.А. // *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2011. № 52. С. 91-96.
15. Гаврилова Н.В., Кудряш В.И., Литейнов Ю.В., Харченко Е.Л. и др. // *Альтернативная энергетика и экология*. 2008. № 8. С. 10-26.
16. Гоц И.Ю., Климов А.С., Маджуро А.С., Нечаев Г.Г. // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2012. Т. 3. № 1. С. 67-72.
17. Ольшанская Л.Н., Попова С.С., Закирова С.М. // *Электрохимия*. 2000. Т. 36. № 8. С. 951-958.
18. Ольшанская Л.Н., Терина Е.М., Ничволодин А.Г. // *Электрохимическая энергетика*. 2001. Т. 1. № 4. С. 49-53.
19. Попова С.С., Целуйкина Г.В., Кабанов Б.Н. // *Электрохимия*. 1985. Т. 21. № 2. С. 161-167.
20. Попова С.С. Фазы внедрения в электрохимии и электрохимической технологии. Саратов. Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та. 1993. 78 с.
21. Lukyanova V.O., Gots I.Y. // *Condensed Matter and Interphases*. 2020. Vol. 22. No 4. pp. 481-488.

# Sorption and thermodynamic characteristics of aluminium electrodes modified with europium over a wide temperature range

© 2021 Lukyanova V.O., Gots I.Yu.

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov*

This paper studies the effect of temperature on the hydrogen sorption by an aluminium alloy doped with europium. The aluminium electrodes were modified using cathodic incorporation. At first, europium was incorporated from a 0.5 mol dimethylformamide (DMF) solution of europium salicylate with a cathodic polarisation potential of -2.9 V (relative to non-aqueous silver chloride electrode) at 25°C. Then hydrogen from an aqueous-organic electrolyte (dimethylformamide and water, in a ratio of 7:3) was introduced to the prepared aluminium-europium electrode at the following temperatures: 253.15; 263.15; 273.15; 283.15; 293.15; 303.15; 313.15; and 323.15 K. During the experiment, we used potentiostatic curves to calculate the diffusion-kinetic characteristics of hydrogen sorption during electrolysis, such as the incorporation constant, the concentration of atoms incorporated in the matrix, the diffusion coefficient, and the adsorption value. We also determined the effect of the cathodic incorporation temperature on the nucleation process and thermodynamic characteristics of the obtained electrodes. We used the electromotive force method to determine the thermodynamic properties: Gibbs free energy ( $\Delta G$ ), entropy ( $\Delta S$ ), enthalpy ( $\Delta H$ ), and activation energy. The study showed that an increase in the temperature results in an increase in  $\Delta G$ ,  $\Delta S$ , and  $\Delta H$ , which means that at higher temperatures the degree of system disorder increases. An analysis of the potentiostatic curves in various coordinates demonstrated that the hydrogen diffusion process is accompanied by the parallel growth of the hydride layer, which occurs due to the chemical interaction between hydrogen and the elements of the Al-Sm alloy.

**Keywords:** electromotive force, REE, aluminium matrix, hydrogen, potentiostatic method, micro-structure, diffusion-kinetic characteristics.

## References

1. Wang J., Li G., Fu K., Li X., *Journal of Materials Science*, 2019, Vol. 54, No 20, pp 13334-13343. DOI: 10.1007/s10853-019-03608-3
2. Hosono H., Kitano M., *Chemical Reviews*, 2021, Vol. 121, No 5, pp. 3121-3185. DOI: 10.1021/acs.chemrev.0c01071
3. Prigent J., Joubert J.M., Latroche M., *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, Vol. 42, No 35, pp. 22348-22352. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.002
4. Hirscher M., Yartys V.A., Baricco M., von Colbe J.B. et al., *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, No 827, pp. 153548. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.153548
5. Yong H., Guo S., Yuan Z., Qi Y., Zhao D. et al., *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, Vol. 44, No 31, pp.16765-16776. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.281
6. Huot J., Cuevas F., Deledda S., Edalati K. et al., *Materials*, 2019, Vol. 12, No 17, pp. 2778. DOI: 10.3390/ma12172778
7. Percheron-Guegan A., Lartigue C., Achard J.C., *Journal of the Less common Metals*, 1985, Vol. 109, No 2, pp. 287-309. DOI: 10.1016/0022-5088(85)90061-X
8. Luo Q., Li J., Li B., Liu B. et al., *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, Vol. 7, No 1, pp. 58-71. DOI: 10.1016/j.jma.2018.12.001
9. Vargas S.J., Schaeffer N., Souza J.C., da Silva L.H. et al., *Waste Management*, 2021, Vol. 125, pp.154-162. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.02.038
10. Zhang S., Saji S.E., Yin Z., Zhang H. et al., *Advanced Materials*, 2021, Vol. 33, No 16, pp. 2005988. DOI: 10.1002/adma.202005988
11. Hadjixenophontos E., Dematteis E.M., Berti N., Wołczyk A.R. et al., *Inorganics*, 2020, Vol. 8, No 3, pp.17. DOI: 10.3390/inorganics8030017
12. Fu K., Li G., Li J., Liu Y. et al., *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, No 696, pp.60-66. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.11.182
13. Gots I.Y., Lukyanova V.O., *Perspektivnye materialy*, 2020, No 2, pp. 39-47 DOI: 10.30791/1028-978X-2020-2-39-47
14. Olshanskaja L.N., Danilova E.A., Kircheva A.A., *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhn'ogo universitetu*, 2011, No 52, pp. 91-96.

15. Gavrilova N.V., Kudrjash V.I., Litejnov Ju.V., Harchenko E.L. et al., *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaja jenergetika i jekologija*, 2008, No 8, pp. 10-26.
16. Gots I.Y., Klimov A.S., Madzhulo A.S., Nechaev G.G., *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2012, Vol. 3, No 1, pp. 67-72.
17. Olshanskaja L.N., Popova S.S., Zakirova S.M., *Electrokhimia*, 2000, Vol. 36, No 8, pp. 951-958.
18. Olshanskaja L.N., Terina E.M., Nichvolodin A.G., *Electrokhimicheskaya energetika*, 2001, Vol. 1, No 4, pp. 49-53.
19. Popova S.S., Celujkina G.V., Kabanov B.N., *Electrokhimia*, 1985, Vol. 21, No 2, pp.161-167.
20. Popova S.S., Fazy vnedrenija v jelektrohimii i jelektrohimicheskoj tehnologii. Saratov, Izd-vo Sarat. gos. tehn. un-ta, 1993, 78 p.
21. Lukyanova V.O., Gots I.Y., *Condensed Matter and Interphases*, 2020, Vol. 22, No 4, pp. 481-488. DOI: 10.17308/kcmf.2020.22/3118

**Лукьянова Виктория Олеговна** – аспирант кафедры «Химия и химическая технология материалов», Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов

**Гоц Ирина Юрьевна** – к.х.н., доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия», Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов

**Lukyanova Victoria O.** – post-graduate student of the department "Chemistry and Chemical Technology of Materials", Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, e-mail: [lukyanova.viky@yandex.ru](mailto:lukyanova.viky@yandex.ru)

**Gots Irina Yu.** – Ph.D., associate professor of the department "Materials Science and Biomedical Engineering", Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, e-mail: [irina.gots@mail.ru](mailto:irina.gots@mail.ru)