Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственной
университет, 2021

УДК 546.72(54-116):[544.47:542.943]

Оригинальная статья

**КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В ГЕТЕРОГЕННОЙ РЕАКЦИИ
ФЕНТОНА ПОВЕРХНОСТИ НАНОПОРИСТОГО ЖЕЛЕЗА,
ПОЛУЧЕННОГО ПОСРЕДСТВОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО
ДЕАЛЛОИНГА В РАСПЛАВЛЕННЫХ ХЛОРИДНЫХ СМЕСЯХ**

Д.А. Роженцев¹, Р.Р. Мансуров², Н.К. Ткачев¹, О.В. Русских², А.А. Остроушко²

¹ФГБУН «Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения
Российской академии наук»

620990, Россия, Екатеринбург, ул. Академическая, 20

²НИИ физики и прикладной математики ФГАОУ ВО «Уральского федерального
университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

alexander.ostroushko@urfu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.919

Аннотация: Исследованы образцы частично окисленного микро- и нанопористого железа, полученного методом высокотемпературного деаллоинга железо-марганцевого сплава в солевом расплаве. При помощи электронной микроскопии получены данные о морфологии образцов и составе их поверхности, установлено, что уже после отмычки при комнатной температуре на воздухе образовались оксидные фазы железа в виде вискероов толщиной порядка 10 нм. В ходе получения образцов достигалось количественное удаление марганца из исходного сплава. Оценена каталитическая активность полученных образцов в гетерогенной реакции Фентона по окислению красителя метилового оранжевого пероксидом водорода. На первом этапе протекания реакции, описываемой уравнением реакции первого порядка, ее скорость определялась наиболее активной расходуемой частью образцов, далее реакция переходила в стационарный режим. Более высокой каталитической активностью обладали нанопористые образцы.

Ключевые слова: нанопористое железо, деаллоинг, вискеры оксидов железа, каталитическая активность, реакция Фентона.

1. Введение

Метод высокотемпературного деаллоинга в солевых расплавах является перспективным с точки зрения получения новых наноматериалов, образующих пространственную взаимно-непрерывную структуру (bi-continuous) твердого тела и пор. Такие материалы могут быть использованы в различных областях: катализ, создание имплантируемых композитов и т.д. К нанопористым металлам, которые могут быть синтезированы таким образом, относится и металлическое железо ($NP-Fe$), однако к настоящему времени известно всего лишь 2 работы о его успешном получении из твердого ферромарганца [1-2]. Деаллоинг в водных растворах ферромарганца и тройных сплавов $Fe-Mn-Zn$, полученных цинкованием поверхности, применявшийся в работе [1], имеет ряд недостатков, главным из которых является многостадийный процесс с промежуточным отжигом при повышенных температурах. В нашей работе [2] предложен альтернативный подход, при котором удаление марганца из

твердого сплава – dealloying – и отжиг вблизи или выше температуры рекристаллизации железа ведутся параллельно в расплаве солевой эвтектики. Свойства получаемых пористых структур зависят от состава исходного материала и в значительной степени от условий проведения электрохимического деаллоинга (EDL) [2]. В настоящей работе исследованы образцы поверхности нанопористого железа, которое, как было найдено, имеет частично окисленную поверхность и фазы оксидов железа формируют структуры вискеро-подобной фазы на металлической поверхности.

2. Экспериментальная часть

В качестве исходного материала для деаллоинга был использован железо-марганцевый сплав $Fe_{0,5} - Mn_{0,5}$ в виде стержней диаметром 4 мм, высотой 10 мм, полученный сплавлением порошков железа и марганца в печи Таммана при 1420°C в алундовом тигле. Деаллоинг проводили в потенциостатическом режиме в расплаве $LiCl - KCl$ при 400°C и $NaCl - KCl$ при 700°C . Анодное растворение проводили в трехэлектродной электрохимической ячейке, заполненной предварительно высушенным аргоном. Смесь солей нагревали до необходимой температуры в вакууме и подвергали гомогенизации в течение 30 минут. В качестве катода использовалась молибденовая проволока $d = 2$ мм; в качестве электрода сравнения – платиновая проволока $d = 1$ мм. Рабочим электродом (анодом) служил образец ферромарганца, который приваривался к токопроводу из нержавеющей стали $d = 4$ мм. В ходе процесса происходило растворение марганца, как более электрохимически активного компонента, с образованием пористого железа.

Структуру и состав поверхности полученных образцов изучали при помощи сканирующей электронной микроскопии (AURIGA CrossBeam «Carl Zeiss NTS», Германия). Для управления, контроля работы и анализа полученных данных пользовались программным пакетом «Analysis Station» («AURIGA series», Version 3.7). Исследования проводили в Уральском центре коллективного пользования «Современные нанотехнологии» (УрФУ).

Каталитическую активность нанопористого железа оценивали с использованием гетерогенной реакции Фентона [3]. Для этого навеску изучаемого материала 75 мг помещали в 10 мл 3 мкМ водного раствора красителя метилового оранжевого квалификации «х.ч.». Далее добавляли 0,25 мл 30 % пероксида водорода. Процесс разложения красителя при комнатной температуре контролировали по убыли оптической плотности раствора на длине волны 464 нм с помощью спектрофотометра Thorlabs CCS 100, укомплектованного оптоволоконным зондом Thorlabs

Transmission Dip Probe TP22.

3. Результаты и их обсуждение

Электронно-микроскопические исследования позволили установить, что при использованных условиях деаллоинга удалось достичь нанометровых размеров пор в полученных образцах. Рис. 1 наглядно это иллюстрирует. На рис. 2 видно наличие на поверхности зерен железа по крайней мере еще одной фазы. Рентгенографический анализ не позволяет установить структуру этой фазы ввиду относительно небольшой толщины образований, однако элементный анализ указывает на наличие помимо железа еще и кислорода. В среднем содержание железа на поверхности составило 45,6 ат. % по усредненным данным, полученным с разной локализацией зонда микроанализатора. При удалении окисленной поверхности выпуклой части зерен с помощью ионного пучка содержание железа достигало 76–84 ат. %. На той стороне образца, которая фиксировалась в токоподводе и не подвергалась деаллоингу, фиксировалось наличие марганца локально до 31,9 ат. %. Таким образом, можно полагать, что наблюдаемые вис커еры образованы оксидом железа переменного состава, образующимся на активной поверхности железа на воздухе после деаллоинга. Разное (переменное) содержание кислорода в оксиде характерно для вюстита $Fe_{1-x}O$, являющегося ярко выраженной нестехиометрической фазой [4]. Образование нановискероов можно объяснить тем, что мольный объем оксида железа больше, чем у самого металлического железа, поэтому $Fe_{1-x}O$ образует рельеф в виде вискероов, возвышающихся над поверхностью основных зерен. Содержание железа в вюстите, исходя из приведенных выше данных элементного анализа, составило в среднем $0,88 \pm 0,02$ формульной единицы, что укладывается в рамки существования этого соединения (0,83–0,93) Для оксида железа, как и других его соединений [5] характерна также каталитическая активность, которую он проявляет, например, в реакции Фентона [3, 6-8].

Проведение гетерогенной реакции Фентона с исследуемыми образцами подтвердило наличие у них каталитической активности. На рис. 3 и рис. 4 приведены соответствующие кинетические зависимости. Исходя из того, что кинетика обесцвечивания органических красителей в реакции Фентона описывается по крайней мере формально уравнением реакции первого порядка [6, 7], была проведена стандартная обработка полученных данных. На рис. 3 видно, что кинетическая зависимость имеет два участка: на первом из них скорость выше, а затем снижается. При обработке в координатах, соответствующих реакциям более высокого порядка, линеаризовать данные не удастся. Наличие двух участков

кинетической зависимости может свидетельствовать о том, что наиболее активная часть каталитической композиции расходуется необратимо в первые моменты времени и после ее инактивации (окисления) реакция Фентона переходит в стационарный режим. Это подтверждается, в частности, визуальным наблюдением возникновения некоторого количества коричневого осадка.

Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение образца нанопористого железа: а – линейный масштаб 2 мкм, б – 20 мкм. Размер пор: 1 – 0,06 мкм, 2 – 0,08 мкм, 3 – 0,11 мкм.

Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение образца микропористого железа. Линейный масштаб – 200 нм.

Оценка констант скорости в гетерогенной реакции Фентона на двух участках кинетической зависимости (см. рис. 3) дала следующие результаты: $k_1 = 2.1 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, $k_2 = 8.6 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$. Для сравнения в работе [6] для реакции Фентона (с метиленовым синим), где катализатором выступало пористое слабо и сильно окисленное железо, были получены соответственно константы скорости $9,6 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ и $8,4 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$.

Рис. 3. Кинетические данные по реакции Фентона: зависимость $\ln(A/A_0)$ от времени (мин); A_0 – начальная оптическая плотность раствора, A – текущая оптическая плотность. Микропористое железо.

Рис. 4. Кинетические данные по реакции Фентона: зависимость $\ln(A/A_0)$ от времени (мин); A_0 – начальная оптическая плотность раствора, A – текущая оптическая плотность. Нанопористое железо.

В работе [7] на медно-кобальтовом оксидном катализаторе достигнуты результаты (по конго красному) $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (20°C) и $1,9 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (50°C). Авторы [8] сообщают о достижении на композите, включающем оксид железа(III), значений по Orange II и сульфаметоксазолу $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, а в реакции Фентона с фотохимической активацией: $5,6 \cdot 10^{-4} - 6,9 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. В целом 2-й образец (см. рис. 4) имеет, по-видимому, более высокую каталитическую активность, чем 1-й. Вероятнее всего, реакция окисления протекает с диффузионными затруднениями, по крайней мере, частичными. На 1-м образце такую тенденцию можно лишь предположить, а на 2-м это становится более явным: кинетические кривые все более напоминают диффузионные. На двух участках, где условно можно вычислить константу скорости первого порядка, как для 1-го образца, она выше для образца № 2: $5,16 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (первый участок) и $1,22 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (второй участок), соответственно. Для нанопористого образца (2) с размерами пор порядка 100 нм диффузионные затруднения не кажутся удивительными, а являются скорее закономерными в условиях гетерогенного катализа в растворе при комнатной температуре.

4. Заключение

В ходе исследований показано, что в результате проведения высокотемпературного деаллоинга в расплавленной солевой эвтектике ($\text{LiCl} - \text{KCl}$) ферромарганца эквимольного состава, микропористое и полученное в условиях, описанных в работе [2], нанопористое железо частично окисляется на воздухе с образованием на поверхности нановискеров вюстита с характерной толщиной около 10 нм и длиной порядка 100 нм. Удаление марганца из исходного сплава проходит количественно. Полученная поверхность обладает каталитической активностью в гетерогенной реакции Фентона, сравнимой с активностью наноконпозиций на основе железа и его оксидов, полученных другими методами, такими как темплатный синтез, а также медно-кобальтовых оксидных катализаторов, используемых для защиты от загрязнения окружающей среды. Каталитическое окисление красителя метилового оранжевого пероксидом водорода в присутствии нанопористых образцов хотя и может сопровождаться диффузионными затруднениями, тем не менее его скорость в целом выше, чем у микропористых образцов. Сравнение проведено по участкам кинетических кривых, описываемых уравнением реакции первого порядка. Метод получения микро- и нанопористого железа путем деаллоинга в расплавах перспективен и для других возможных областей применения [9, 10], например, использования в биомедицине.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-33-90224). Авторы исследования признательны Пряхиной В.И. за помощь при проведении СЭМ исследований.

Библиографический список:

1. **Heiden, M.** Surface modifications through dealloying of *Fe–Mn* and *Fe–Mn–Zn* alloys developed to create tailorable, nanoporous, bioresorbable surfaces / M. Heiden, D. Johnson, L. Stanciu // *Acta Materialia*. – 2016. – V. 103. – P. 115-127. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.10.002.
2. **Rozhentsev, D.** High-temperature electrochemical synthesis of nanoporous iron by dealloying of ferromanganese in a *LiCl–KCl* eutectic / D. Rozhentsev, N. Tkachev // *Journal of the Electrochemical Society*. – 2021. – V. 168. – № 6. – Art. № 061504. – 4 p. DOI: 10.1149/1945-7111/ac07c3.
3. **Fenton, H.J.H.** Oxidation of tartaric acid in presence of iron / H.J.H. Fenton // *Journal of the Chemical Society, Transactions*. – 1894. – V. 65. – P. 899-911. DOI: 10.1039/ct8946500899.
4. **Лыкасов, А.А.** Физико-химические свойства вюстита и его растворов / А.А. Лыкасов, К. Карел, А.Н. Мень, М.Т. Варшавский, Г.Г. Михайлов. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. – 227 с.
5. **Меньшиков, С.Ю.** Воздействие нанокластерного полиоксометаллата $\{Mo_{72}Fe_{30}\}$ на окисление персульфатом йодид-ионов / С.Ю. Меньшиков, К.А. Белозерова, А.А. Остроушко // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2020. – Вып. 12. – С. 853-859. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.853.
6. **Папынов, Е.К.** Темплатный синтез пористых оксидов железа с магнитными и каталитическими свойствами / Е.К. Папынов, И.А. Ткаченко, В.Ю. Майоров и др. // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11 (часть 4). – С. 816-821.
7. **Shen, Y.** Evaluation of cobalt oxide, copper oxide and their solid solutions as heterogeneous catalysts for Fenton-degradation of dye pollutants / Y. Shen, Z. Zhang, K. Xiao // *RSC Advances*. – 2015. – V. 5. – I. 111. – P. 91846-91854. DOI: 10.1039/c5ra18923c.
8. **González-Rodríguez, J.** Reusable Fe_3O_4 /SBA15 nanocomposite as an efficient photo-fenton catalyst for the removal of sulfamethoxazole and orange II / J. González-Rodríguez, L. Fernández, Z. Vargas-Osorio et al. // *Nanomaterials*. – 2021. – V. 11. – I. 2. – Art. № 533. – 18 p. DOI: 10.3390/nano11020533.
9. **Mody, V.V.** Introduction to metallic nanoparticles / V.V. Mody, R. Siwale, A. Singh, H.R. Mody // *Journal of Pharmacy and BioAllied Sciences*. – 2010. – V. 2. – I. 4. – P. 282-289. DOI: 10.4103/0975-7406.72127.
10. **Perekucha, N.A.** Modification of human monocytes and macrophages by magnetic nanoparticles in vitro for cell-based delivery / N.A. Perekucha, P.A. Smolina, A.M. Demin, V.P. Krasnov, A.G. Pershina // *Bulletin of Siberian Medicine*. – 2020. – V. 19. – № 4. – P. 143-150. DOI: 10.20538/1682-0363-2020-4-143-150.

References:

1. Heiden M., Johnson D., Stanciu L. Surface modifications through dealloying of *Fe–Mn* and *Fe–Mn–Zn* alloys developed to create tailorable, nanoporous, bioresorbable surfaces, *Acta Materialia*, 2016, vol. 103, pp. 115-127. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.10.002.
2. Rozhentsev D., Tkachev N. High-temperature electrochemical synthesis of nanoporous iron by dealloying of ferromanganese in a *LiCl–KCl* eutectic, *Journal of the Electrochemical Society*, 2021, vol. 168, no. № 6, art. no. 061504, 4 p. DOI: 10.1149/1945-7111/ac07c3.
3. Fenton H.J.H. Oxidation of tartaric acid in presence of iron, *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 1894, vol. 65, pp. 899-911. DOI: 10.1039/ct8946500899.
4. Lykasov A.A., Karel K., Men' A.N., Warshawskii M.T., Mikhailov G.G. *Fiziko-khimicheskie svoystva vyustita i ego rastvorov* [Physico-chemical properties of wustite and its solutions]. Sverdlovsk, Ural Scientific Center of Academy of Science USSR Publ., 1987, 227 p. (In Russian).
5. Menshikov S.Yu., Belozeroва K.A., Ostroushko A.A. Vozdejstvie nanoklasternogo polioksometalata $\{Mo_{72}Fe_{30}\}$ na okislenie persulfatom jodid-ionov [Influence of the nanocluster $\{Mo_{72}Fe_{30}\}$ polyoxometalate on oxidation of iodine-ions by persulfate], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2020, issue 12, pp. 853-859. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.853. (In Russian).
6. Papynov E.K., I.A. Tkachenko, V.Y. Mayorov et al. Templatnyj sintez poristyx oksidov zheleza s magnitnymi i kataliticheskimi svoystvami [Template synthesis of porous iron oxides with magnetic and catalytic

properties], *Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental Research]*, 2014, vol. 11 (part 4), pp. 816-821. (In Russian).

7. Shen Y., Zhang Z., Xiao K. Evaluation of cobalt oxide, copper oxide and their solid solutions as heterogeneous catalysts for Fenton-degradation of dye pollutants, *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 111, pp. 91846-91854. DOI: 10.1039/c5ra18923c.

8. González-Rodríguez J., Fernández L., Vargas-Orsorio Z. et al. Reusable Fe_3O_4 /SBA15 nanocomposite as an efficient photo-fenton catalyst for the removal of sulfamethoxazole and orange II, *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, issue 2, art. no 533, 18 p. DOI: 10.3390/nano11020533.

9. Mody V.V., Siwale R., Singh A., Mody H.R. Introduction to metallic nanoparticles, *Journal of Pharmacy and BioAllied Sciences*, 2010, vol. 2, issue 4, pp. 282-289. DOI: 10.4103/0975-7406.72127.

10. Perekucha N.A., Smolina P.A., Demin A.M., Krasnov V.P., Pershina A.G. Modification of human monocytes and macrophages by magnetic nanoparticles in vitro for cell-based delivery, *Bulletin of Siberian Medicine*, 2020, vol. 19, no. 4, pp. 143-150. DOI: 10.20538/1682-0363-2020-4-143-150.

Original paper

CATALYTIC PROPERTIES IN THE HETEROGENEOUS FENTON REACTION OF THE SURFACE OF NANOPOROUS IRON OBTAINED BY ELECTROCHEMICAL DEALLOYING IN MELTED CHLORIDE MIXTURES

D.A. Rozhentsev¹, R.R. Mansurov², N.K. Tkachev¹, O.V. Russkikh², A.A. Ostroushko²

¹*Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia*

²*Scientific Research Institute of Physics and Applied Mathematics, Ural Federal University named
after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.919

Abstract: The samples of partially oxidized micro- and nanoporous iron obtained by high-temperature dealloying of an iron-manganese alloy in a molten salt were investigated. The data concerning the structure of the samples and the composition of their surface were obtained by electron microscopy; it was found that after washing at room temperature in air the oxide phases of iron were formed as whiskers with a thickness of about 10 nm. During the preparation of the samples a quantitative removal of manganese from the initial alloy was achieved. The catalytic activity of the obtained samples in the heterogeneous Fenton reaction was estimated by oxidation of methyl orange by hydrogen peroxide. The rate of the first stage of the reaction, which was described by the first-order equation, was determined by the most active spent part of the samples, and then the reaction passed into the stationary mode. The nanoporous samples possessed a higher catalytic activity.

Keywords: nanoporous iron, dealloying, iron oxide whiskers, catalytic activity, Fenton reaction.

Роженцев Данил Александрович – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории расплавленных солей Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской Академии Наук

Мансуров Ренат Русланович – к.х.н., научный сотрудник отдела химического материаловедения НИИ физики и прикладной математики института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ткачев Николай Константинович – д.х.н., заведующий лабораторией расплавленных солей Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской Академии Наук

Русских Ольга Владимировна – к.х.н., старший научный сотрудник отдела химического материаловедения НИИ физики и прикладной математики института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Остроушко Александр Александрович – д.х.н., профессор, профессор кафедры физической и неорганической химии института естественных наук и математики, главный научный сотрудник, заведующий отделом химического материаловедения НИИ физики и прикладной математики, института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Rozhentsev A. Danil – postgraduate student, Junior Researcher, Molten Salts Laboratory in Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Renat R. Mansurov – Ph. D., Researcher, Department of Chemical Materials Science in Scientific Research Institute of Physics and Applied mathematics of Institute of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Nikolai K. Tkachev – Dr. Sc., Head of Molten Salts Laboratory. Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Olga V. Russkikh – Ph. D., Senior Researcher, Department of Chemical Materials Science in Scientific Research Institute of Physics and Applied mathematics of Institute of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Alexander A. Ostroushko – Dr. Sc., Full Professor, Physical and Inorganic Chemistry Department of Institute of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Chief Researcher and Head of Department of Chemical Materials Science in Scientific Research Institute of Physics and Applied Mathematics of Institute of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Поступила в редакцию/received: 15.06.2021; после рецензирования/revised: 15.07.2021; принята/accepted 20.07.2021.