

А. Ф. Дресвянников, А. Э. Мухамадеев, Т. П. Сулганов

СИНТЕЗ ФЕРРИТА ЦИНКА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРОВАННЫХ РЕАГЕНТОВ

Ключевые слова: электролиз, коаксиальный электролизер, сталь 3, анодное растворение, низкотемпературная обработка, рентгенофазовый анализ, феррит цинка, размеры частиц.

В работе продемонстрирована возможность синтеза наноразмерных частиц феррита цинка со структурой шпинели в водных растворах нитрата цинка с добавкой хлороводородной кислоты. Процесс образования $ZnFe_2O_4$ включает стадию анодного растворения электрода из стали 3 в коаксиальном электролизере с образованием некоторого количества феррита цинка в объеме реактора и аморфных гидроксидов цинка (II) и железа (III). При использовании в качестве катода узкоцилиндрического электрода с площадью во много раз меньшей площади анода $S_k \ll S_a$, вследствие постоянного образования OH^- - ионов на катоде и их транспорта по направлению от центра к периферии электролизера за счет перемешивания раствора пузырьками интенсивно выделяющегося на катоде водорода, происходит заполнение всего объема раствора в реакторе – электролизере ионами гидроксила. В результате изменения pH реакционной смеси происходит образование малорастворимых соединений с формированием частиц сложного оксида – феррита цинка. После высокотемпературной термической обработки ($1100^\circ C$) полученный продукт на 99 и более процентов состоит из феррита цинка. Фазовый состав синтезированных образцов подтвержден методами рентгенофазового анализа и локального микроанализа. Согласно результатам, синтезированный дисперсный продукт представляет собой феррит цинка с кубической кристаллической структурой. С помощью локальной энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии установлено соответствие элементного состава структурной формуле феррита цинка. Согласно микроизображениям частицы феррита цинка имеют сферическую форму и представляют собой агрегаты более мелких образований, сформированных в процессе осаждения в водной среде и в результате последующего воздействия высокой температуры..

A. F. Dresvyannikov, A. E. Mukhamadeev, T. P. Sultanov

THE SYNTHESIS ZINC FERRITE IN AQUEOUS SOLUTIONS WITH ELECTROGENERATED REAGENTS

Keywords: electrolysis, coaxial electrolyser, steel 3, anodic dissolution, low-temperature treatment, X-ray phase analysis, zinc ferrite, particle size.

The paper demonstrates the possibility of synthesis of nanoscale zinc ferrite particles with a spinel structure in aqueous solutions of zinc nitrate with hydrochloric acid addition. The $ZnFe_2O_4$ formation process includes the stage of anodic dissolution of a steel 3 electrode in a coaxial electrolyser with the formation of a certain amount of zinc ferrite in the reactor volume and amorphous zinc (II) and iron (III) hydroxides. When using a narrow cylindrical electrode with an area many times smaller than the area of the anode $S_k \ll S_a$ as a cathode, due to the constant formation of OH^- ions on the cathode and their transport from the center to the periphery of the electrolyser due to mixing of the solution with bubbles of hydrogen intensively released on the cathode, the entire volume of the electrolysis reactor is saturated with hydroxyl ions. As a result of changes in the pH of the reaction mixture, poorly soluble compounds are formed, including the formation of particles of a complex oxide, zinc ferrite. After high-temperature heat treatment ($1100^\circ C$), the resulting product consists of 99 percent or more zinc ferrite. The phase composition of the obtained samples was confirmed by X-ray phase analysis. According to his results, the synthesized dispersed product is zinc ferrite with a cubic crystal structure. Using local energy-dispersive X-ray spectroscopy, the correspondence of the elemental composition to the structural formula of zinc ferrite was established. According to the microimages, zinc ferrite particles have a spherical enlarged shape as a result of their aggregation under the influence of high calcination temperature compared with low heat treatment.

В настоящее время магнитные наночастицы являются предметом значительного интереса благодаря их широкому использованию в таких областях науки и техники, как: электроника, оптика, спинтроника, медицина, фотоника и другие [1-4]. Ферриты-шпинели – это ферритмагнитные материалы на основе оксидов железа и оксидов переходных металлов с общей формулой MFe_2O_4 (где M – двухвалентный катион, M=Zn, Ni, Cd, Mg). Этот тип ферритов кристаллизуется в кубической решетке с пространственной группой $Fd3m$. [5,6]. Одним из востребованных представителей этого типа ферритов является феррит цинка $ZnFe_2O_4$, относящийся к группе нормальной шпинели, в которой ионы Zn занимают тетраэдрические позиции, а ионы Fe – октаэдрические. Наночастицы феррита цинка обладают низкой коэрцитивной силой и остаточной намагниченностью, высокой магнитной проницаемостью, низкой

стоимостью и нетоксичностью [7-11]. Этот магнитомягкий материал широко используется в качестве основы газовых датчиков, сенсоров, катализаторов, адсорбентов катионов тяжелых металлов, диэлектриков [12-17]. По причине высокой пожароопасности и токсичности литиевых батарей феррит цинка является одним из важнейших электродных материалов экологически безопасных батарей нового поколения [18]. В связи с пониженной токсичностью ионов цинка по сравнению с другими металлами возможно его использование в биомедицине (доставка лекарств, МРТ, магнитная гипертермия и др.) [19]. Выбор метода синтеза является основополагающим фактором при получении материалов с заданными характеристиками. Для синтеза ферритов-шпинелей применяют стандартный керамический метод [20], золь-гель технологии [21], ме-

тод разложения органического компонента реакционной смеси [22], микроэмульсионный метод [23], гидротермальный [24], электрохимический и прочие.

Целью настоящего исследования является разработка методики синтеза феррита цинка с применением электрогенерирования реагентов в коаксиальном реакторе-электролизере со стальным растворимым анодом. Для этого решались сопутствующие задачи: выявление закономерностей электрохимического поведения стального (сталь 3) анода в исследуемом электролите, а также – изменения pH реакционной смеси в процессе электролиза.

Экспериментальная часть

Материалы и методика синтеза

Синтез феррита цинка проводили в коаксиальном бездиафрагменном электролизере-реакторе путем проведения электролиза с помощью источника постоянного тока марки «Mastech NY3005D-2», при плотности тока 3 А/дм² в течение двух часов при комнатной температуре и естественной аэрации. Анод – выполнен в виде цилиндра из стали 3, катодом является проволока из высоколегированной стали 12Х18Н10Т. Исходными веществами для приготовления водного раствора служили нитрат цинка Zn(NO₃)₂ квалификации ч.д.а. (АО «Ленреактив») и хлороводородная кислота квалификации х.ч. (АО «Ленреактив»). Полученный осадок для созревания отстаивали в маточном растворе в течение суток, отфильтровывали в колбе Бунзена с воронкой Бюхнера и фильтром «синяя лента» с помощью вакуумного насоса марки «Chemker 300», многократно промывали дистиллированной водой для удаления примесей и достижения реакции нейтральной среды. Далее он в течение нескольких часов высушивался в сушильном шкафу Binder при температуре 100°C. Прокаливание высушенного продукта осуществляли в муфельной печи марки «SNOL 6,7/1300» при 1100°C в течение двух часов.

Методы анализа

Фазовый состав синтезированных образцов определяли методом рентгеновской дифракции на дифрактометре D2 PHASER (Bruker) с использованием источника излучения CoK_α. Идентификацию кристаллических фаз осуществляли путем сопоставления полученных экспериментальных значений межплоскостных расстояний и относительных интенсивностей с эталонными, приведенными в международной картотеке базы PDF-2. Количественный фазовый состав осадка рассчитывали по методу корундовых чисел.

Термический анализ (ТГ-ДТГ, ДТА) проводили с использованием синхронного термоанализатора STA 6000 (Perkin Elmer); нагрев образцов осуществлялся в корундовом тигле в воздушной среде в интервале значений температуры 30–1000°C со скоростью 10°C/мин.

Размер частиц дисперсии определяли методом динамического светорассеяния с помощью анализатора Zetasizer Nano ZS, Malvern. Для определения дисперсного состава использовали лазерный анализатор Mastersizer 2000 (Malvern).

Для получения микроизображения частиц и исследования локального элементного состава образцов использовали сканирующий электронный микроскоп Carl Zeiss Evo LS10 со встроенным энергодисперсионным спектрометром (EDS) Inca X-Max.

Электрохимическое поведение стали (Ст.3) исследовали с помощью потенциостата-гальваностата «Elins P-2х» методами поляризационных кривых, циклической вольтамперометрии и хронопотенциометрии. Исследуемый электрод предварительно тщательно зачищали наждачной бумагой различной зернистости, полировали и обезжировали этиловым спиртом.

Результаты и обсуждение

Для металлов семейства железа в водных растворах, содержащих ионы NO₃⁻, анодная поляризационная кривая имеет вид с тремя характерными участками: анодно-анионная активация, область пассивности и область перепассивации. Однако, при добавлении в электролит небольшого количества Cl⁻ ионов наблюдается исключительно активное растворение металла (рис. 1), что в данном случае является необходимым условием, способствующим генерированию в растворе ионов железа (II).

В условиях стационарности (рис. 2, а) потенциал стали достаточно медленно смещается в сторону более положительных значений, что связано с пассивацией поверхности металла.

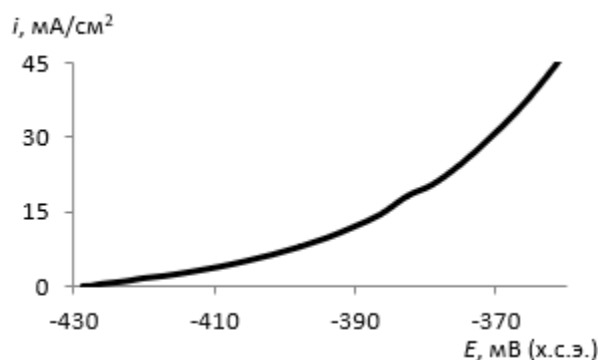


Рис. 1 – Анодная поляризационная кривая Ст.3 в водном растворе 0.15 M Zn(NO₃)₂ + 0.046 M HCl при скорости развертки потенциала 2 мВ/с

Fig. 1 – Anodic polarization curve of steel 3 in an aqueous solution 0.15 M Zn(NO₃)₂ + 0.046 M HCl at a potential sweep rate of 2 mV/s

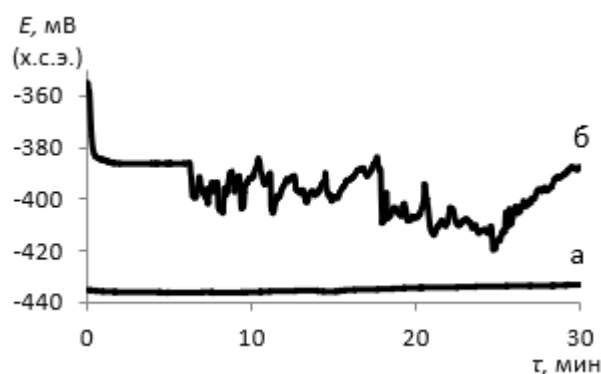


Рис. 2 – Хронопотенциограмма Ст.3 при разомкнутой цепи $i=0$ (а) и анодной поляризации $i=30$ мА/см² (б) в электролите состава, моль/л: 0.15 Zn(NO₃)₂ + 0.046 HCl

Fig. 2 – Chronopotentiogram of st.3 with an open circuit $i=0$ (a) and galvanostatic anode polarization $i=30$ mA/cm² (b) in an electrolyte of the composition, mol/l: 0.15 Zn(NO₃)₂ + 0.046 HCl

При гальваностатической поляризации (рис. 2, б) в момент включения тока потенциал резко смещается в анодную область до примерно -355 мВ и в течение 1 минуты происходит его быстрый спад вплоть до значения -386 мВ, что может свидетельствовать об образовании активных поверхностных комплексов. В течение 5 минут потенциал стали находится в условиях стационарности, после чего возникают значительные по амплитуде колебания потенциала на протяжении всего времени экспозиции, связанные с периодической активацией и пассивацией локальных участков поверхности металла.

Для общей оценки электрохимических процессов на стальном электроде снимали циклические вольтамперограммы (пример ЦВА представлен на рисунке 3). Электрохимическое поведение стали 3 в исследуемых средах характеризуется необратимыми процессами анодного растворения с образованием более глубоких локальных очагов, что подтверждается визуальным наблюдением. На катодной ветви ЦВА четко прослеживается один пик тока с максимумом при потенциале -1148 мВ, соответствующий реакции восстановления ионов цинка (II).

На анодной ветви наблюдаются несколько пиков, характеризующих постадийную ионизацию цинка и резкий подъем тока в области потенциалов $\Delta E = -500 \div -350$ мВ, соответствующей ионизации железа.

В процессе электролиза с растворимым анодом из стали 3 в коаксиальном бездиафрагменном электролизере вследствие постоянного образования OH^- - ионов на центральном узкоцилиндрическом электроде и их

транспорта по направлению от центра к периферии реактора за счет перемешивания раствора пузырьками интенсивно выделяющегося на катоде водорода, а также – анодного растворения железа, происходит насыщения всего объема раствора в реакторе – электролизере ионами гидроксила и железа. Изменение pH реакционной смеси способствует образованию мало-растворимых соединений с формированием, в том числе, частиц сложного оксида – феррита цинка. Данные рентгенофазового анализа полученного и высушенного осадка сведены в таблицу 1.

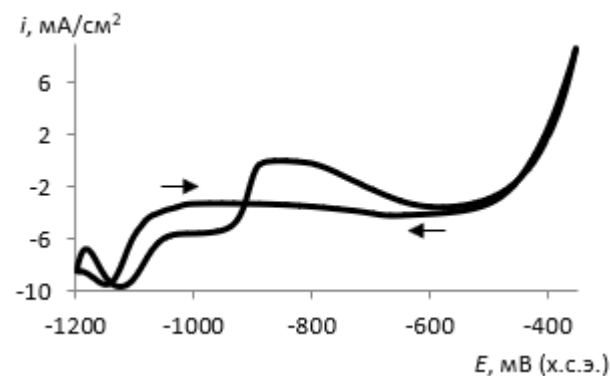


Рис. 3 – Циклическая вольтамперограмма стали 3 в водном растворе состава, моль/л: 0.15 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ + 0.046 HCl , скорость развертки потенциала 2 мВ/с

Fig. 3 – Cyclic voltammogram of steel 3 in an aqueous solution of the composition, mol/l: 0.15 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ + 0.046 HCl , potential sweep rate of 2 mV/s

Таблица 1 – Результаты рентгенофазового анализа синтезированных образцов после низко- и высокотемпературной термообработки.

Table 1 – Results of X-ray phase analysis of synthesized samples after low- and high-temperature heat treatment.

№ п/п	Наименование системы	Т _{обжига} , °С	Фазовый состав	Содержание, %	ОКР, нм	Пространственная группа	Тип кристаллической решётки (сингония)
1	0,15 М $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ + 0,046 М HCl	100	ZnFe_2O_4	96	22	Fd-3m(227)	кубическая
			Fe_2O_3	4	-	P41212(92)	тетрагональная
2		1100	ZnFe_2O_4	100	78	Fd-3m(227)	кубическая

По данным таблицы 1 можно сделать вывод, что феррит цинка образуется в процессе высушивания осадка при достаточно низкой температуре (100°C). При этом обнаружено также присутствие в образце незначительного количества фазы оксида железа (III): $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (маггемит). Эти данные косвенно подтверждаются результатами термического анализа (рис. 4, таблица 2).

На термогравиметрической кривой исследованном образце осадка, полученного при электролизе, (зелёная линия) в интервале температуры нагрева 25-600°C наблюдается плавная потеря массы (2,04+8,53+2,71=13,28% масс.) В интервале температуры 655-1100°C потеря массы незначительна, она составляет (13,33-13,28=0,05 %масс). Наличие потери в

низкотемпературной области характерно для процессов удаления слабосвязанной (адсорбированной молекулярной) формы воды. В среднетемпературной области (300-600°C), как правило, происходит удаление структурной (гидроксильной) формы воды. На ДСК кривой видно, что плавная потеря образцом массы до 400°C сопровождается эндотермическими эффектами незначительной интенсивности. Начиная с 400°C вплоть до 1000°C имеет место протяженный экзотермический эффект. Такой характер эффекта может быть отнесен к структурным перестроениям в формирующихся кристаллах. Полученные данные о наблюдаемых термоэффектах сведены в таблицу 2.

Исходя из полученных результатов можно отметить отсутствие острой необходимости в высокотемпературной обработке, и, хотя при этом выход продукта составляет 100%, повышение температуры влияет на размер кристаллитов феррита цинка в плане их существенного роста. Распределение частиц по размерам полученного прокаливанием образца феррита цинка демонстрирует бимодальный характер (рис. 5). Средний объемный размер агрегированных частиц составляет 69,68 мкм. Эти размеры коррелируют с данными сканирующей электронной микроскопии (рис.6).

Локальный элементный анализ произвольного участка микрочастицы феррита цинка (рис.7) демонстрирует наличие минимального количества примесей (например, Al 0,80 % ат.) и соответствие элементного состава основной структурной формуле $ZnFe_2O_4$, ат. %: O 68,11; Fe 19,89; Zn 11,11.

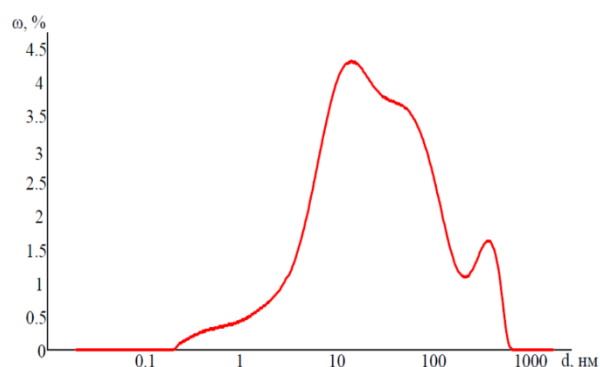


Рис. 5 – Распределение частиц по размерам полученного прокаливанием образца феррита цинка.

Fig. 5 – Particle size distribution of the zinc ferrite sample obtained by calcination

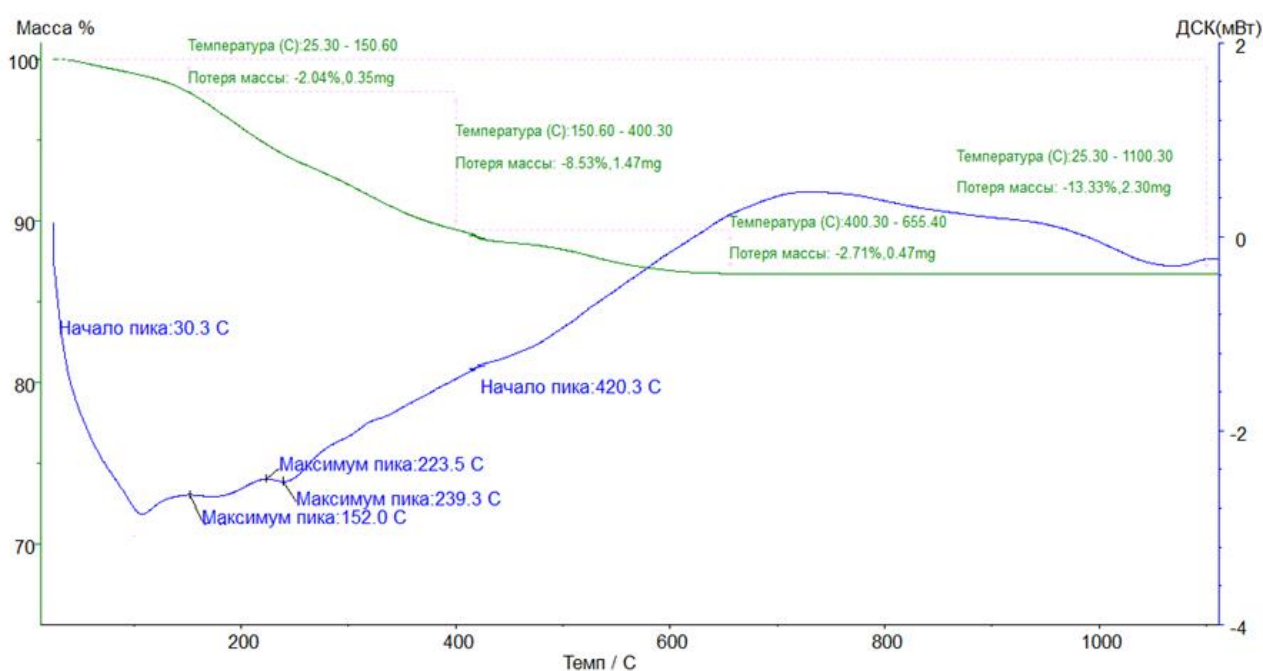


Рис. 4 – ТГА, ДТГ - кривые выделенного из раствора продукта синтеза.

Fig. 4 – TGA, DTG – curves of the synthesis product isolated from the solution

Таблица 3 – Результаты термического анализа

Table 3 – Results of thermal analysis

№	Наименование образца	Интервал температуры, °C			Общая потеря массы в интервале 30-1100°C, % масс
		потеря массы, % масс.			
1	Осадок продукта синтеза (Т _{прок.} =100°C)	$\frac{25-150}{2,04}$	$\frac{150-400}{8,53}$	$\frac{450-655}{2,71}$	13,33

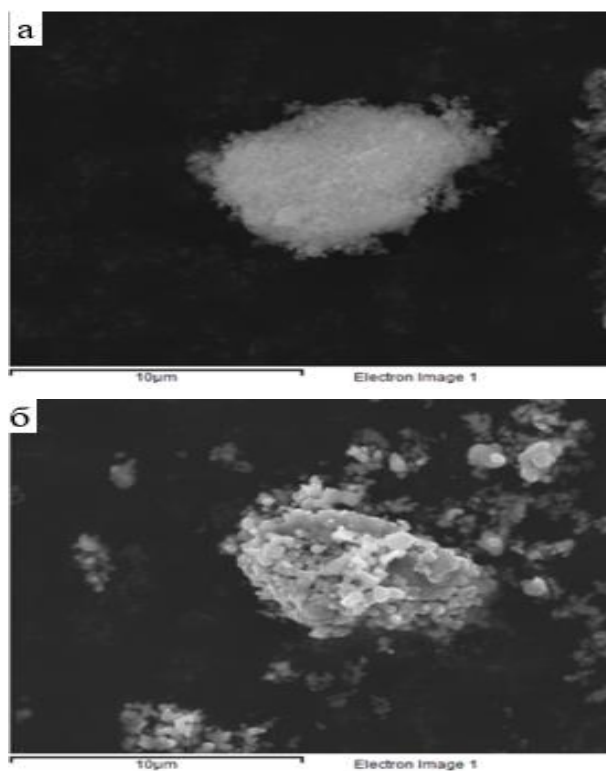
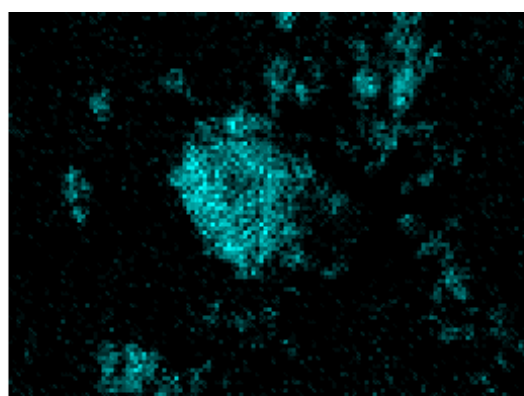
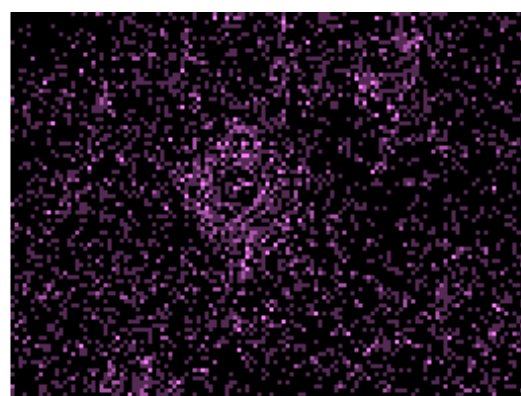


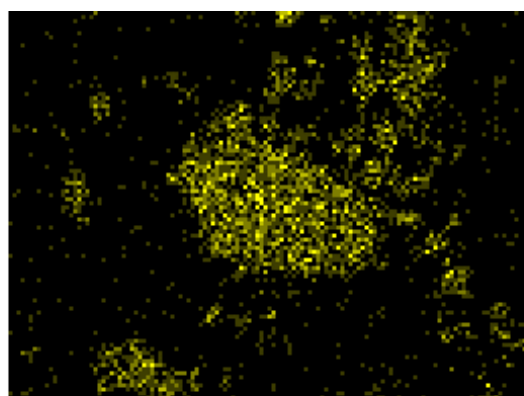
Рис. 6 – Микроизображения частиц феррита цинка: а – 100°C; б - 1100°C
Fig. 6 – Microimages of zinc ferrite particles: а – 100°C; б - 1100°C



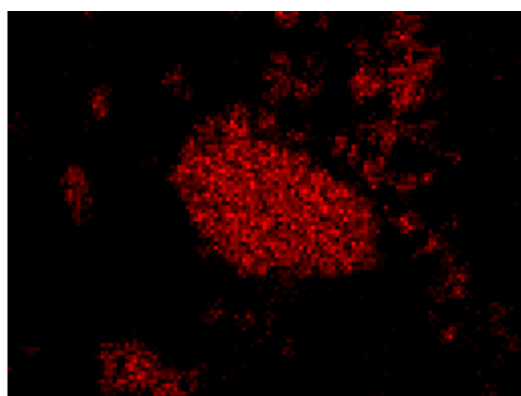
O Ka1



Al Ka1



Zn Ka1



Fe Ka1

Рис. 7 – Результаты энергодисперсионного анализа EDS образца прокаленного при 1100°C
Fig. 7 – Results of energy dispersive analysis (EDS) of sample calcined at 1100°C

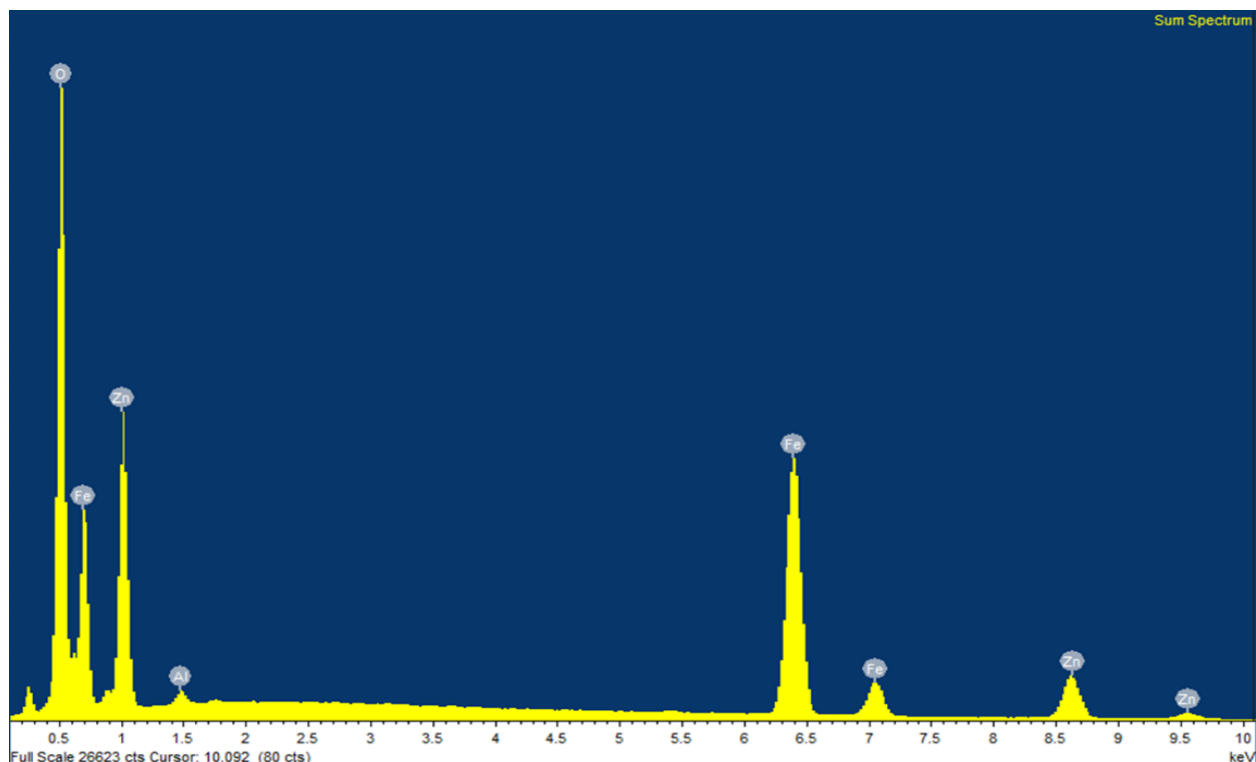


Рис. 8 – Результаты рентгеновского спектрального микроанализа поверхности образца

Fig. 8 – Results of X-ray spectral microanalysis of the sample surface

Заключение

В данном исследовании продемонстрирована возможность синтеза частиц феррита цинка в коаксиальном реакторе-электролизере с растворимым стальным анодом и использованием электрогенерирования реагентов. Выявлено, что присутствие небольшого количества Cl^- -ионов в исследуемом растворе позволяет активировать сталь 3 и, как следствие, интенсифицировать ее анодное растворение в процессе электролиза с последующим взаимодействием продуктов растворения, электрогенерированных OH^- -ионов и компонентов электролита. В процессе электролиза повышение pH реакционной среды во всем объеме электролизера-реактора происходит за счет интенсивной генерации OH^- -ионов на катоде и их быстрого перемещения от центра к периферии реактора в результате направленного перемещения пузырьков водорода, выделяющегося на узкоцилиндрическом катоде. Взаимодействие электрогенерированных ионов (OH^- , Fe^{2+}) с компонентами электролита приводит к образованию частиц осадка, размеры которых увеличиваются в результате агрегирования (средний размер агрегатов 69,68 мкм).

По результатам рентгенофазового анализа осадка установлено, что образование феррита цинка с минимальным количеством примеси в виде Fe_2O_3 возможно при низкотемпературной обработке 100°C . Феррит цинка кристаллизуется в кубической решетке с размером кристаллитов порядка 20 нм. 100 % выход феррита цинка достигается при высокотемпературной обработке (1100°C) порошка, полученного высушиванием осадка. При этом размер кристаллитов увеличивается до 78 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00. Тема исследования «Создание научных основ получения новых мультифункциональных материалов широкого спектра применения» (FZSG-2023-0008). Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технологического университета».

Литература

1. R. Khan, S. Al Otaibi, A.J. Babqi, N. Rahman, M. Sohail, R.M. Yusupov, S.S. Abdullaev, A. Khan, S. Iqbal, T. Del Rosso, Tahir, Q. Zaman, A. Khan, *J. Mater. Sci: Mater Electron.*, **34**, 169 (2023). DOI: 10.1007/s10854-022-09711-7
2. N. Dudchenko, S.V. Pawar, I. Pereishtein, D. Fixler, *Materials*, **15**, 7 (2022). DOI: 10.3390/ma15072601
3. A. Marrella, G. Suarato, S. Fiocchi, E. Chiamello, M. Bonato, M. Parazzini, P. Ravazzani, *Front. Bioeng. Biotechnol.*, **11** (2023). DOI: 10.3389/fbioe.2023.1219777
4. Ю.А. Кокшаров, С.П. Губин, И.В. Таранов, Г.Б. Хомутов, Ю.В. Гуляев, *РЭ*, **67**, 99-116 (2022). DOI: 10.1134/S1064226922020073
5. V. Kumar, K. Sarkar, S. Kumar, R. Srivastava, R. Kumar, *IR-JAЕH*, **2**, 6, 1659–1664 (2024). DOI: 10.47392/IR-JAЕH.2024.0228
6. S. Gaffar, A. Kumar, U. Riaz, *J. Electroceram.*, **51**, 4, 246–257 (2023). DOI: 10.1007/s10832-023-00333-x
7. O.D. Dastjerdi, H. Shokrollahi, S. Mirshekari, *Inorg. Chem. Commun.*, **153**, Article 110797 (2023). DOI: 10.1016/j.inoche.2023.110797
8. A. Hao, X. Ning, *Front. Mater.*, **8**, Article 718869 (2021). DOI: 10.3389/fmats.2021.718869

9. S. Mukherjee, *NMMS*, **2**, 2, 8–14 (2020). DOI: 10.30564/omms.v2i2.1863
10. A. Sheikh, P. Jain, *Int. J. Nanomed. Nanosurg.*, **2**, 3 (2016). DOI: 10.16966/2470-3206.115
11. A. Goldman, *Modern Ferrite Technology*. Springer Science & Business Media US. 2006, p. 438.
12. X. Zhao, L. Baharinikoo, M.D. Farahani, B. Mahdizadeh, A.A.K. Farizhandi, *Sci. Rep.*, **12**, 1. 5987 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-10036-y
13. P. Hu, De-an Pana, X. Wang, J. Tian, J. Wang, S. Zhang, A.A. Volinskiy, *J. Magn. Magn. Mater.*, **323**, 3, 569-573 (2011). DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.10.013
14. T. Tatarchuk, M. Myslin, I. Lapchuk, A. Shyichuk, A.P. Murthy, R. Gargula, P. Kurzydło, B.F. Bogacz, A.T. Pędziwiatr, *Chemosphere*, **270**. Article 129414 (2021). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129414
15. N.M. Mahmoodi, *Mater. Res. Bull.*, **48**, 10, 4255-4260 (2013). DOI: 10.1016/j.materresbull.2013.06.070
16. K. Wu, J. Li, C. Zhang, *Ceram. Int.*, **45**, 9 (2019) DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.03.086
17. S. Fareed, A. Jamil, F. Afsar, F. Sher, C. Li, X. Xu, M.A. Rafiq, *J. Electron. Mater.*, **48**, 5677–5685 (2019). DOI: 10.1007/s11664-019-07389-y
18. K. Pradhan, U. Singh, S. Shukla, S.P. Duttgupta, S. Saxena, *Nanotechnology*, **36**, 15, Article 155401 (2025). DOI: 10.1088/1361-6528/adb3ac
19. E.S. Anooj, S.J. Sreelekshmi, S.T. Gopukumar, P.K. Praseetha, *Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res.*, **46**, 4, 22-26 (2017).
20. K.K. Bhatt, Y.S. Niwate, S.S. Garje, D.C. Kothari, *Mater. Chem. Phys.*, **161**, 256-259 (2015) DOI: 10.1016/j.matchemphys.2015.05.047
21. N.P. Shabel'skaya, M.A. Egorova, A.M. Radzhabov, V.A. Ul'yanova, Yu.A. Gaidukova, *Inorg Mater.*, **59**, 3, 251–256 (2023). DOI: 10.1134/S0020168523030111
22. В.В. Семченко, Н.П. Шабельская, Я.А. Кузьмина, *Успехи соврем. естествозн.*, **4**, 36-41 (2018)
23. H. Zhu, X. Gu, D. Zuo, Z. Wang, N. Wang, K. Yao, *Nanotechnology*, **19**, 40 (2008). DOI: 10.1088/0957-4484/19/40/405503
24. K.R. Lestari, *Int. J. Sci. Rev.*, **4**, 2, 179–184 (2022). DOI: 10.54783/influencejournal.v4i2.50
25. Ю.А. Попов, *Усп. хим.*, **74**, 5, 435-451 (2005).
4. Yu.A. Koksharov, S.P. Gubin, I.V. Taranov, G.B. Khomutov, Yu.V. Gulyaev, *РЭ*, **67**, 99-116 (2022). DOI: 10.1134/S1064226922020073
5. V. Kumar, K. Sarkar, S. Kumar, R. Srivastava, R. Kumar, *IR-JAEH*, **2**, 6, 1659–1664 (2024). DOI: 10.47392/IR-JAEH.2024.0228
6. S. Gaffar, A. Kumar, U. Riaz, *J. Electroceram.*, **51**, 4, 246–257 (2023). DOI: 10.1007/s10832-023-00333-x
7. O.D. Dastjerdi, H. Shokrollahi, S. Mirshekari, *Inorg. Chem. Commun.*, **153**, Article 110797 (2023). DOI: 10.1016/j.inoche.2023.110797
8. A. Hao, X. Ning, *Front. Mater.*, **8**, Article 718869 (2021). DOI: 10.3389/fmats.2021.718869
9. S. Mukherjee, *NMMS*, **2**, 2, 8–14 (2020). DOI: 10.30564/omms.v2i2.1863
10. A. Sheikh, P. Jain, *Int. J. Nanomed. Nanosurg.*, **2**, 3 (2016). DOI: 10.16966/2470-3206.115
11. A. Goldman, *Modern Ferrite Technology*. Springer Science & Business Media US. 2006, p. 438.
12. X. Zhao, L. Baharinikoo, M.D. Farahani, B. Mahdizadeh, A.A.K. Farizhandi, *Sci. Rep.*, **12**, 1. 5987 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-10036-y
13. P. Hu, De-an Pana, X. Wang, J. Tian, J. Wang, S. Zhang, A.A. Volinskiy, *J. Magn. Magn. Mater.*, **323**, 3, 569-573 (2011). DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.10.013
14. T. Tatarchuk, M. Myslin, I. Lapchuk, A. Shyichuk, A.P. Murthy, R. Gargula, P. Kurzydło, B.F. Bogacz, A.T. Pędziwiatr, *Chemosphere*, **270**. Article 129414 (2021). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129414
15. N.M. Mahmoodi, *Mater. Res. Bull.*, **48**, 10, 4255-4260 (2013). DOI: 10.1016/j.materresbull.2013.06.070
16. K. Wu, J. Li, C. Zhang, *Ceram. Int.*, **45**, 9 (2019) DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.03.086
17. S. Fareed, A. Jamil, F. Afsar, F. Sher, C. Li, X. Xu, M.A. Rafiq, *J. Electron. Mater.*, **48**, 5677–5685 (2019). DOI: 10.1007/s11664-019-07389-y
18. K. Pradhan, U. Singh, S. Shukla, S.P. Duttgupta, S. Saxena, *Nanotechnology*, **36**, 15, Article 155401 (2025). DOI: 10.1088/1361-6528/adb3ac
19. E.S. Anooj, S.J. Sreelekshmi, S.T. Gopukumar, P.K. Praseetha, *Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res.*, **46**, 4, 22-26 (2017).
20. K.K. Bhatt, Y.S. Niwate, S.S. Garje, D.C. Kothari, *Mater. Chem. Phys.*, **161**, 256-259 (2015) DOI: 10.1016/j.matchemphys.2015.05.047
21. N.P. Shabel'skaya, M.A. Egorova, A.M. Radzhabov, V.A. Ul'yanova, Yu.A. Gaidukova, *Inorg Mater.*, **59**, 3, 251–256 (2023). DOI: 10.1134/S0020168523030111
22. V.V. Semchenko, N.P. Shabel'skaya, Ya.A. Kuz'mina, *Uspokhi sovrem. estestvozn.*, **4**, 36-41 (2018)
23. H. Zhu, X. Gu, D. Zuo, Z. Wang, N. Wang, K. Yao, *Nanotechnology*, **19**, 40 (2008). DOI: 10.1088/0957-4484/19/40/405503
24. K.R. Lestari, *Int. J. Sci. Rev.*, **4**, 2, 179–184 (2022). DOI: 10.54783/influencejournal.v4i2.50
25. Yu.A. Popov, *Usp. Khim.*, **74**, 5, 435-451 (2005).

References

1. R. Khan, S. Al Otaibi, A.J. Babqi, N. Rahman, M. Sohail, R.M. Yusupov, S.S. Abdullaev, A. Khan, S. Iqbal, T. Del Rosso, Tahir, Q. Zaman, A. Khan, *J. Mater. Sci: Mater Electron.*, **34**, 169 (2023). DOI: 10.1007/s10854-022-09711-7
2. N. Dudchenko, S.V. Pawar, I. Pereishtein, D. Fixler, *Materials*, **15**, 7 (2022). DOI: 10.3390/ma15072601
3. A. Marrella, G. Suarato, S. Fiocchi, E. Chiaramello, M. Bonato, M. Parazzini, P. Ravazzani, *Front. Bioeng. Biotechnol.*, **11** (2023). DOI: 10.3389/fbioe.2023.1219777
4. Yu.A. Popov, *Usp. Khim.*, **74**, 5, 435-451 (2005).

© **А. Ф. Дресвянников** – д-р хим. наук, проф., профессор кафедры Аналитической химии, сертификации и менеджмента качества (АХСМК), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, alfedr@kstu.ru; **А. Э. Мухамадеев** – аспирант кафедры АХСМК, КНИТУ, m.artur_98@mail.ru; **Т. П. Султанов** – ассистент кафедры Физики, КНИТУ.

© **A. F. Dresvyannikov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Full Professor, Professor of the Departments of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management (ACCQM), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, alfedr@kstu.ru; **A. E. Mukhamadeev** – PhD-student of the ACCQM, KNRTU, m.artur_98@mail.ru; **T. P. Sultanov** – Assistant of the Physics department, KNRTU.

Дата поступления рукописи в редакцию – 03.02.26.

Дата принятия рукописи в печать – 27.02.26.