

УДК 669.5-172

DOI 10.62595/1819-5245-2026-3-19-28

**СИНТЕЗ ФЕРРИТА ЦИНКА И ИЗУЧЕНИЕ
ЕГО СТРУКТУРНЫХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК****Е. Н. ПОДДЕНЕЖНЫЙ, Н. Е. ДРОБЫШЕВСКАЯ, А. А. БОЙКО,
О. С. НЕВЗОРОВА***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Получение феррита цинка осуществляли двумя методами: прямым синтезом из оксидов цинка и железа с последующим прессованием цилиндрических заготовок и их спеканием в муфельной печи, а также термохимическим синтезом микрокристаллических порошков с использованием метода «золь-гель-горение». Источниками для синтеза ZnFe_2O_4 по керамической технологии служили оксиды цинка ZnO и железа Fe_2O_3 . Для синтеза методом «золь-гель-горение» применяли азотнокислые соли цинка и железа. В качестве комплексообразователя и восстановителя была использована уксусная кислота, а гелеобразующим агентом и дополнительным горючим служил поливиниловый спирт (ПВС). Исследования структурных характеристик с использованием рентгенофазового анализа (РФА) показали, что образцы керамики ZnFe_2O_4 , полученные прямым синтезом с последующим дроблением спека, прессованием и прокаливанием при 1200°C , имеют однофазную кубическую структуру. По данным РФА порошков, полученных термохимическим методом, можно сделать заключение, что образцы, полученные при 650 и 1200°C , также обладают кубической кристаллической структурой шпинели ZnFe_2O_4 . При этом интенсивность рефлексов на дифрактограмме повышается при прокаливании на 1200°C , что указывает на упорядочение структуры и повышение кристалличности. Также имеются незначительные рефлексы, принадлежащие $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (маггемиту). Исследования морфологии порошков с использованием метода сканирующей электронной микроскопии показали, что порошки ZnFe_2O_4 , прокаленные на воздухе при температуре 1200°C (3 ч), представляют собой агломераты, состоящие из пластинчатых частиц с размерами около $1,0$ мкм. Изучение полученных порошков методом EDX выявило наличие атомов цинка, железа и кислорода в соотношении, соответствующем формуле ZnFe_2O_4 . Имеется незначительное количество углерода, вызванное вхождением примеси в структуру при горении в атмосфере углеродсодержащих компонентов (уксусной кислоты и ПВС).

Ключевые слова: феррит цинка, керамические образцы, микрокристаллические порошки, термохимический синтез.

Для цитирования. Синтез феррита цинка и изучение его структурных и морфологических характеристик / Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко, О. С. Невзорова // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 3 (106). – С. 19–28. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-3-19-28>

**SYNTHESIS OF ZINC FERRITE AND STUDY
OF ITS STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL
CHARACTERISTICS****E. N. PODDENEZHNY, N. E. DROBYSHEVSKAYA, A. A. BOIKA,
O. S. NEVZOROVA***Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

Zinc ferrite was prepared using two methods: direct synthesis from zinc and iron oxides-followed by pressing cylindrical compacts and sintering them in a muffle furnace-and thermochemical synthesis of microcrystalline powders via the sol-gel combustion method. Zinc oxide (ZnO) and iron oxide (Fe_2O_3)

served as the starting materials for the ceramic synthesis of ZnFe_2O_4 , whereas zinc and iron nitrates were used for the sol-gel combustion method. Acetic acid acted as the complexing and reducing agent, while polyvinyl alcohol (PVA) served as the gelling agent and additional fuel. Structural characterization using X-ray phase analysis (XRD) revealed that ZnFe_2O_4 ceramic samples—prepared via direct synthesis followed by crushing the sintered product, pressing, and calcining at 1200°C —exhibited a single-phase cubic structure. XRD data for the powders obtained via the thermochemical method indicated that samples processed at 650°C and 1200°C also possessed the cubic spinel structure characteristic of ZnFe_2O_4 . Notably, the intensity of diffraction peaks increased after calcination at 1200°C , indicating structural ordering and enhanced crystallinity. Minor peaks corresponding to $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (maghemite) were also observed. Scanning electron microscopy (SEM) analysis of the powder morphology showed that ZnFe_2O_4 powders calcined in air at 1200°C for 3 hours consisted of agglomerates formed by plate-like particles approximately $1.0\ \mu\text{m}$ in size. EDX analysis of the obtained powders revealed the presence of zinc, iron, and oxygen atoms in a ratio corresponding to the formula ZnFe_2O_4 . A small amount of carbon was also detected, resulting from the incorporation of impurities into the structure during combustion in an atmosphere containing carbon-bearing components (acetic acid and PVA).

Keywords: zinc ferrite, ceramic samples, microcrystalline powders, thermochemical synthesis.

For citation. Poddenezhny E. N., Drobyshevskaya N. E., Boika A. A., Nevzorova O. S. Synthesis of Zinc Ferrite and study of its structural and morphological characteristics. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 3 (106), pp. 19–28 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-3-19-28>

Введение

Оксидные системы на основе ферритов переходных металлов со структурой шпинели являются перспективными материалами благодаря сочетанию важных технических характеристик и простоте получения [1].

Применение таких материалов весьма разнообразно. Это – фотокатализаторы, сенсоры, магнитные материалы [2–4].

Феррит цинка ZnFe_2O_4 особенно выделяется среди ферритовых шпинелей широким кругом применений. Это магнитные системы хранения данных, сеть мобильной связи 5G, технологии суперконденсаторов и устройства, предназначенные для разложения воды с получением газообразного водорода [5]. Феррит цинка также активно изучается как перспективный материал для нового поколения металл-ионных аккумуляторов [6]. Перспективным применением феррита цинка является очистка водных растворов от органических красителей и перекиси водорода [7–11].

Для получения ферритов в порошкообразной и керамической форме используются различные методы, включающие реакции в твердом состоянии, совместное осаждение, золь-гель процессы и др. [12].

Твердофазный метод включает в себя физическое перемешивание карбонатного, гидроксидного, сульфатного или оксидного сырья и спекание при температуре около 1100°C . Один из основных недостатков этого способа заключается в том, что при его использовании получают агломерированные крупнозернистые порошки с относительно небольшой площадью поверхности [13].

В методе соосаждения растворимые соли металлов, такие как сульфаты, нитраты или хлориды, осаждаются в виде гидроксидов, карбонатов, оксалатов. Конечный кристаллический оксид получают путем сушки осадка и его прокаливания при высокой температуре в подходящих условиях [14].

Золь-гель метод – это также химический метод получения магнитомягких ферритов. Это предполагает использование хлоридов и алкоксидов металлов, которые подвергаются конденсационной полимеризации и гидролизу с образованием гелей. Дальнейшая термообработка удаляет летучие побочные продукты и приводит к конечному кристаллическому состоянию [15, 16].

Одним из вариантов этого метода является процесс «золь-гель-горение» с последующей термической обработкой получаемого прекурсора – термохимический син-

тез [17–20]. Недостатком этого метода являются необходимость тщательного измельчения с целью получения мелкокристаллического порошка высокой степени однородности. К достоинствам указанного метода следует отнести возможность получения кристаллических порошков в микро- и наноструктурированных формах, а также значительное сокращение времени синтеза.

Цель работы состоит в изучении структурных и морфологических характеристик феррита цинка, полученного по керамической технологии прямым спеканием оксидов цинка и железа, а также порошков ZnFe_2O_4 , синтезированных термохимическим методом.

Материалы и методы исследования

Синтез феррита цинка осуществляли двумя методами: прямым синтезом из оксидов цинка и железа с последующим прессованием цилиндрических заготовок и их спеканием в муфельной печи, а также с использованием метода «золь-гель-горение».

Для получения керамических образцов стехиометрического феррита цинка вначале осуществляли смешение и длительное растирание оксидов цинка (ZnO , х. ч., ГОСТ 10262-73) и железа (Fe_2O_3 , х. ч., CAS 1309-37-1) в молярном соотношении, соответствующем формуле ZnFe_2O_4 в среде изопропилового спирта, затем смесь помещали в керамическую лодочку, прокаливали при температуре 1200°C в течение 3 часов и отжигали при 1000°C (3 ч), далее спек дробили, растирали в ступке, формовали цилиндрическую заготовку диаметром 30 мм методом одноосного прессования при давлении 10 Тс и спекали для получения цилиндрических керамических образцов.

Преимущество метода прямого синтеза заключается в его простоте и использовании недорогих прекурсоров. Данный метод синтеза является практически безотходным, наносящим минимальное воздействие на окружающую среду. Основным недостатком является многоступенчатость процессов, длительность термической обработки, а также необходимость размола получаемых материалов.

Для получения порошков ZnFe_2O_4 по методу «золь-гель-горение» в качестве исходных компонентов использовали $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, х. ч., CAS 1029-41-4 и $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, х. ч. Комплексообразователем и восстановителем служила уксусная кислота ледяная CH_3COOH (х. ч., ГОСТ 61-75, РФ), а гелеобразующим агентом и дополнительным горючим – поливиниловый спирт (ПВС) марки 16/1 (ГОСТ 10779-78, РФ). Для исследования фазового состава композитов использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-7 с излучением $\text{Cu-K}\alpha$. Электронно-микроскопические исследования и элементный анализ (EDX) проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа S-4800 Hitachi (Япония).

Процесс синтеза ZnFe_2O_4 по методу «золь-гель-горение» осуществляли следующим образом. Взвешивали ингредиенты в соотношении, обеспечивающем формирование стехиометрического соединения, растворяли в уксусной кислоте (в молярном соотношении смеси нитратов и кислоты 1 : 3) и выливали смесь в фарфоровую чашу, ставили в сушильный шкаф, при нагреве до $90\text{--}110^\circ\text{C}$ перемешивали и засыпали порошок ПВС в количестве 5 % от общей массы, далее упаривали смесь при температуре 110°C до состояния высушенного геля. Затем проводили термическую обработку прекурсора в муфельной печи СНОЛ1.6.2.5.1/13 при температуре 650°C в течение 2 часов при скорости подъема температуры $400^\circ\text{C}/\text{час}$. Под воздействием быстрого нагрева происходила термохимическая реакция синтеза феррита железа и в результате получали порошкообразный продукт коричневого цвета. Далее полученный порошок прокаливали при температуре 1200°C в течение 2 часов.

В результате химической реакции при нагреве смеси солей цинка, железа и уксусной кислоты вначале образуются хелатные ацетатонитратные комплексы метал-

лов [21]. Затем при нагреве гелеобразного прекурсора в муфельной печи происходит инициирование окислительно-восстановительных реакций между нитратными и ацетатными группами, что приводит к воспламенению ацетатонитратов с образованием гидратированных оксидов цинка и железа, которые формируют соединение ZnFe_2O_4 . Этапы получения порошка феррита цинка приведены на рис. 1.

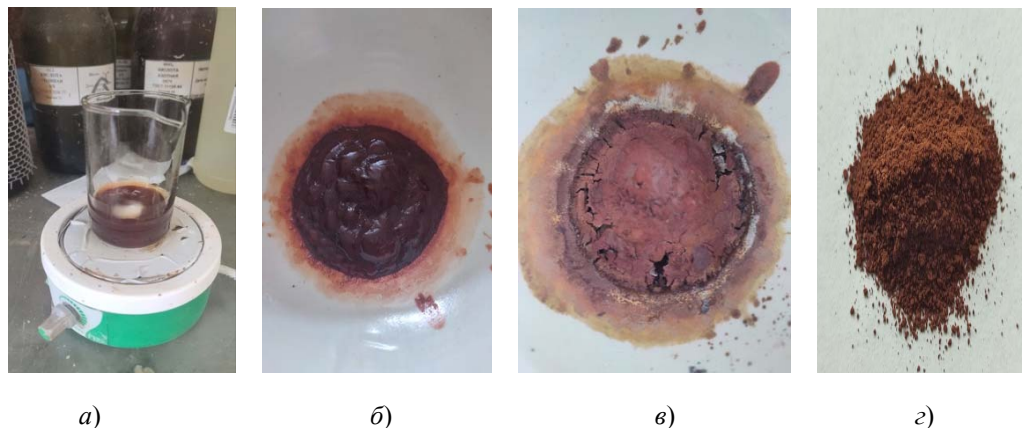


Рис. 1. Этапы получения порошка ZnFe_2O_4 :

а – смесь азотнокислых солей цинка и железа и уксусной кислоты;
б – гелеобразный прекурсор; в – высушенный гель; г – порошок феррита цинка

Обсуждение результатов

На основе анализа данных рентгенофазового анализа (РФА) дисковых образцов, полученных по керамической технологии однократным спеканием оксидов цинка и железа, можно сделать заключение, что в данном случае происходит неполный синтез стехиометрического соединения (рис. 2).

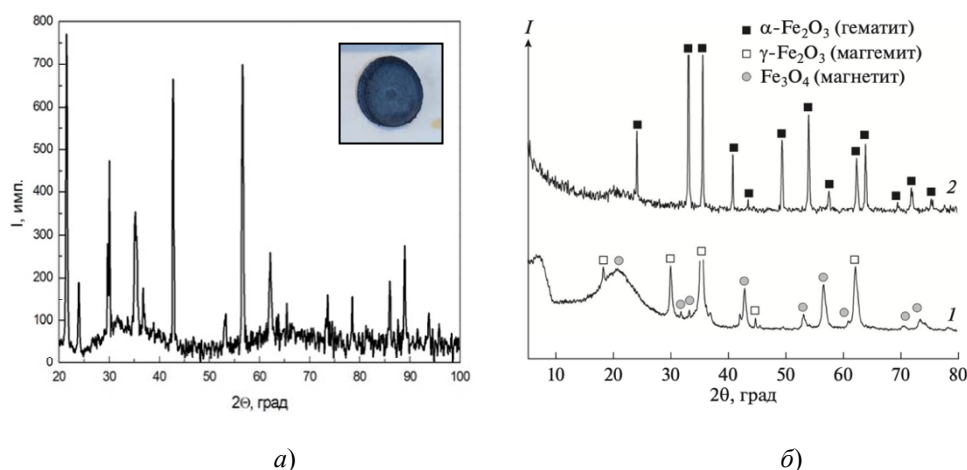


Рис. 2. Дифрактограмма керамики, полученной однократным спеканием (а), дифрактограммы материалов на основе оксидов железа, полученных темплатным синтезом при температурах прокаливания 500 (1) и 900 °С (2) по литературным данным [22] (б)

При исследовании структуры образца на дифрактограмме, кроме полос, принадлежащих ZnFe_2O_4 , имеются пики, соответствующие $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (магнетиту), заметен также небольшой фон от разупорядоченной кристаллической фазы Fe_3O_4 (магнетит), которая формируется в воздушной среде при недостатке кислорода [22].

В отличие от дифрактограммы образцов, полученных однократным спеканием, картина керамики феррита цинка, сформированного двойным синтезом с промежуточным размолом, демонстрирует четко выраженные рефлекссы, соответствующие кубической кристаллической структуре ZnFe_2O_4 (каталог JCPDS № 89-1009) (рис. 3, а), что полностью соответствует литературным данным (рис. 3, б) [23].

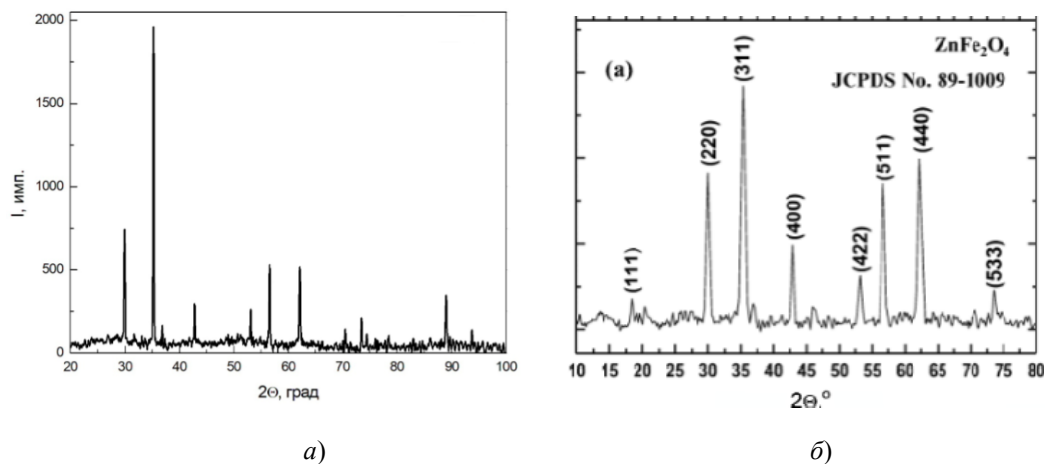


Рис. 3. Дифрактограмма керамики, полученной двойным синтезом с промежуточным размолом (а); дифрактограмма ZnFe_2O_4 по литературным данным [23] (б)

На основе анализа данных РФА порошкообразных образцов, полученных термическим методом, можно сделать заключение о формировании материала кубической кристаллической структуры состава ZnFe_2O_4 уже при 850°C (каталог JCPDS № 89-1009). При этом интенсивность полос повышается при дополнительном прокаливании при 1200°C , что указывает на увеличение кристалличности и упорядочение структуры (рис. 4). Также стоит отметить, что на дифрактограмме присутствуют незначительные примесные пики, скорее всего, принадлежащие $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (маггемит).

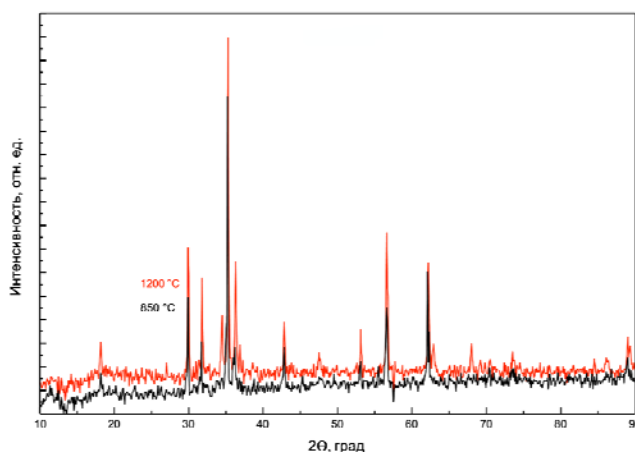


Рис. 4. Дифрактограмма микрокристаллического порошка ZnFe_2O_4 , полученного методом «золь-гель-горение»

Исследования морфологии порошков с использованием метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показали, что порошки ZnFe_2O_4 , прокаленные на воздухе при температуре 1200°C (3 ч), представляют собой агломераты, состоящие из пластинчатых частиц с поперечными размерами около $1,0\text{ мкм}$ (рис. 5).

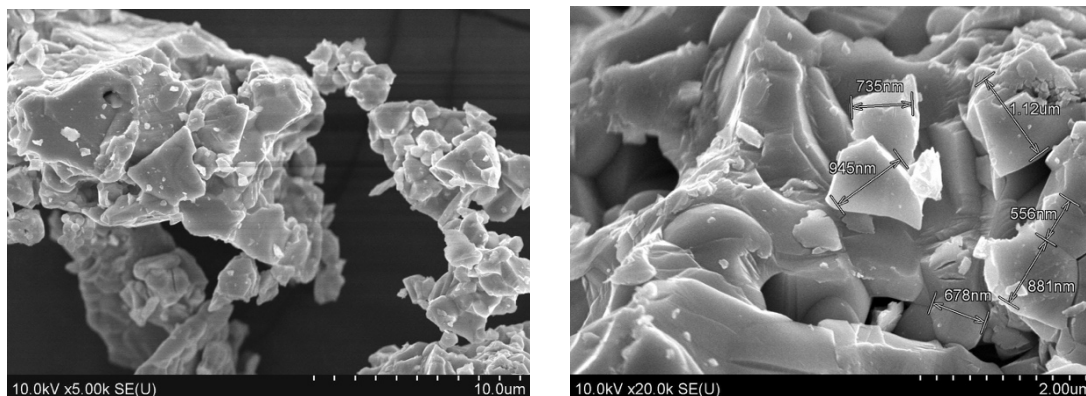


Рис. 5. СЭМ-изображение микрокристаллического порошка ZnFe_2O_4 при разном увеличении

Изучение полученных материалов методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), применяемым для определения локального химического состава фаз (рис. 6), показало наличие атомов цинка, железа и кислорода в соотношении, приведенном в таблице. Имеется незначительное количество примеси, вызванное вхождением углерода в структуру при горении в атмосфере углеродсодержащих компонентов (уксусной кислоты и ПВС).

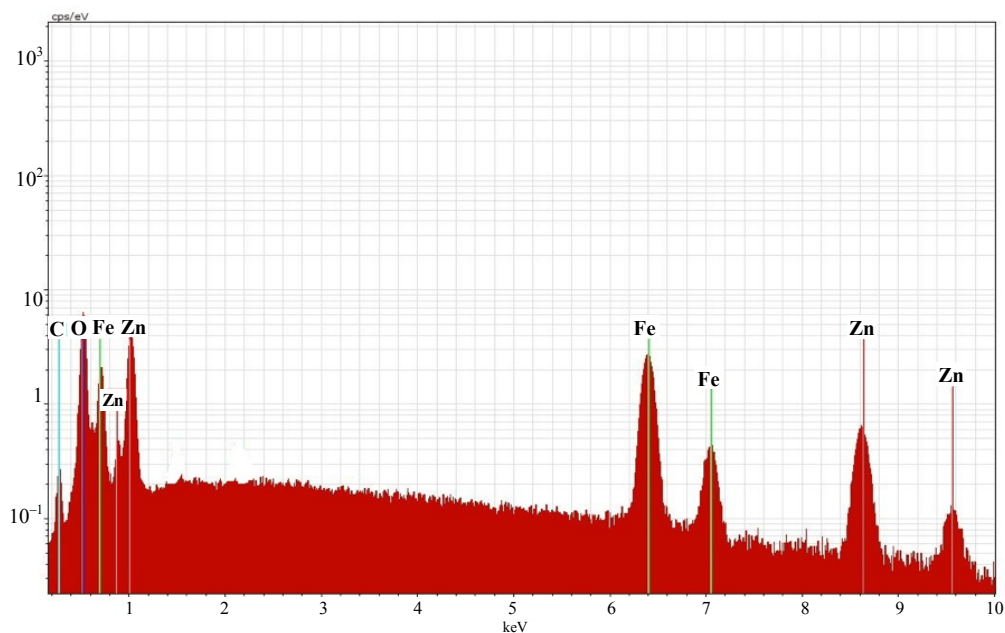


Рис. 6. Элементный состав (EDX) порошка

Элементный состав полученных порошков

Элемент	Атомный номер	Мас. %	Мас. % (нормированный)	Ат. %
Кислород O	8	20,86	22,51	49,63
Железо Fe	26	41,19	44,45	28,08
Цинк Zn	30	28,9	31,19	16,83
Углерод C	6	1,72	1,86	5,45
Общее содержание, %	—	92,67	100	100

Заключение

В результате обобщения вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны два метода получения феррита цинка – прямым синтезом из оксидов цинка и железа с последующим прессованием цилиндрических заготовок и их спеканием в муфельной печи, а также термохимическим синтезом микрокристаллических порошков с использованием метода «золь-гель-горение».

2. Источниками для синтеза ZnFe_2O_4 по керамической технологии служили оксиды цинка ZnO и железа Fe_2O_3 . Для синтеза методом «золь-гель-горение» применяли азотнокислые соли цинка и железа. В качестве комплексообразователя и восстановителя была использована уксусная кислота, а гелеобразующим агентом и дополнительным горючим служил ПВС.

3. Исследования структурных характеристик с использованием РФА показали, что образцы керамики, полученные прямым синтезом с последующим дроблением спека, прессованием и прокаливанием при 1200°C , имеют однофазную кубическую структуру состава ZnFe_2O_4 .

4. По данным РФА порошков, полученных термохимическим методом, можно сделать заключение, что образцы, полученные при 850 и 1200°C , также обладают кубической кристаллической структурой ZnFe_2O_4 . При этом интенсивность полос повышается после прокаливания при 1200°C , что указывает на упорядочение структуры и повышение кристалличности. Также на дифрактограмме имеются незначительные рефлексы, принадлежащие $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (маггемиту).

5. Исследования морфологии полученных материалов с использованием метода СЭМ показали, что порошки ZnFe_2O_4 , прокаленные на воздухе при температуре 1200°C (3 ч), представляют собой агломераты, состоящие из пластинчатых частиц с размерами около $1,0$ мкм.

6. Изучение полученных порошков методом EDX выявило наличие атомов цинка, железа и кислорода в соотношении, соответствующем формуле ZnFe_2O_4 . Имеется незначительное количество углерода, вызванное вхождением примеси в структуру при горении в атмосфере углеродсодержащих компонентов (уксусной кислоты и ПВС).

Исследования проведены в рамках выполнения задания 7.2.8.2 «Синтез и исследование наноразмерных порошков в бинарной системе $\text{TiO}_2\text{--ZnO}$, активированных функциональными добавками (наночастицами оксидов d- и f-металлов) в качестве прекурсоров для формирования керамических структур» ГПНИ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», подпрограмма 7.2 «Наноструктуры, наноматериалы и технологии» на 2026–2030 гг. в Республике Беларусь.

Литература

1. Preparation techniques for zinc ferrites and their applications: A review / S. N. Pund, P. A. Nagawade, A. V. Nagawade [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 60, part 3. – P. 2194–2208. – DOI 10.1016/j.matpr.2022.02.444
2. Highly sensitive acetone gas sensor based on porous ZnFe_2O_4 nanospheres / X. Zhou, J. Liu, C. Wang [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2015. – Vol. 206. – P. 577–583. – DOI 10.1016/j.snb.2014.09.080
3. Electrical and morphological properties of magnetocaloric nano ZnNi ferrite / O. M. Hemeda, N. Y. Mostafa, O. H. Abd Elkader [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – Vol. 394. – P. 96–104. – DOI 10.1016/j.jmmm.2015.05.059
4. Synthesis of nonstoichiometric zinc ferrite nanoparticles with extraordinary room temperature magnetism and their diverse applications / Y. Yang, X. Liu, Y. Yang [et al.] // Journal of Materials Chemistry C. – 2013. – Vol. 1, N 16. – P. 2875–2885. – DOI 10.1039/c3tc00790a

5. Bohra, M. Nanostructured ZnFe_2O_4 : An Exotic Energy Material / M. Bohra, V. Alman, R. Arras // *Nanomaterials*. – 2021. – Vol. 11, N 5. – P. 1286. – DOI 10.3390/nano11051286
6. Электрохимические свойства ZnFe_2O_4 , синтезированного методом твердофазного взаимодействия / В. В. Ефремов, Р. И. Корнейков, С. В. Аксенова [и др.] // *Журнал неорганической химии*. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 181–190. – DOI 10.31857/S0044457X25020059
7. Мартинсон, К. Д. Фотокаталитические и магнитные свойства наночастиц феррита цинка / К. Д. Мартинсон, А. А. Мурашкин // *Журнал технической физики*. – 2025. – Т. 95, № 10. – С. 2021–2028. – DOI 10.61011/JTF.2025.10.61355.84-24
8. Tadjarodi, A. ZnFe_2O_4 nanoparticles and clay encapsulated ZnFe_2O_4 nanocomposite: synthesis strategy, structural characteristics and adsorption of dye pollutants in water / A. Tadjarodi, M. Imani, M. Salehi // *RSC Advances*. – 2015. – Vol. 5, N 69. – P. 56145–56156. – DOI 10.1039/c5ra02163d
9. Hollow $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ composites: High-performance and recyclable visible-light photocatalyst / Q. Xu, J. Feng, L. Li [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – Vol. 641. – P. 110–118. – DOI 10.1016/j.jallcom.2015.04.076
10. Visible-light photocatalytic activity of zinc ferrites / A. Arimi, L. Megatiff, L. I. Granone [et al.] // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. – 2018. – Vol. 366. – P. 118–126. – DOI 10.1016/j.jphotochem.2018.03.014
11. Ma, Y. Insight into the catalytic mechanism of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ for hydrogen peroxide activation under visible light / Y. Ma, Q. Wang, S. Xing // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2018. – Vol. 529. – P. 247–254. – DOI 10.1016/j.jcis.2018.06.020
12. Егорова, М. А. Технология полифункциональных окси-соединений на основе ферритов и хромитов переходных элементов : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / Егорова Марина Александровна ; ЮРГПУ. – Новочеркасск, 2021. – 165 л.
13. Pullar, R. C. Hexagonal Ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics / R. C. Pullar // *Progress in Materials Science*. – 2012. – Vol. 57. – P. 1191–1334. – DOI 10.1016/j.pmatsci.2012.04.001
14. Hajalilou, A. A review on preparation techniques for synthesis of nanocrystalline soft magnetic ferrites and investigation on the effects of microstructure features on magnetic properties / A. Hajalilou, S. A. Mazlan // *Applied Physics A*. – 2016. – Vol. 122. – P. 680. – DOI 10.1007/s00339-016-0217-2
15. Study of the growth process of magnetic nanoparticles obtained via the non-aqueous sol-gel method / I.-C. Masthoff, M. Kraken, D. Mauch [et al.] // *Journal of Materials Science*. – 2014. – Vol. 49, N 14. – P. 4705–4714. – DOI 10.1007/s10853-014-8160-0
16. Facile synthesis of ZnFe_2O_4 nanoparticles with tunable magnetic and sensing properties / P. Guo, L. Cui, Y. Wang [et al.] // *Langmuir*. – 2013. – Vol. 29, N 28. – P. 8997–9003. – DOI 10.1021/la401627x
17. Chauhan, L. Dielectric and magnetic properties of Nickel ferrite ceramics using crystalline powders derived from DL alanine fuel in sol-gel auto-combustion / L. Chauhan, A. K. Shukla, K. Sreenivas // *Ceramics International*. – 2015. – Vol. 41, N 7. – P. 8341–8351. – DOI 10.1016/j.ceramint.2015.03.014
18. Anneal-tuned structural, dielectric and electrical properties of ZnFe_2O_4 nanoparticles synthesized by starch-assisted sol-gel auto-combustion method / R. S. Yadav, J. Havlica, J. Masilko [et al.] // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2016. – Vol. 27, N 6. – P. 5992–6002. – DOI 10.1007/s10854-016-4522-5
19. Size dependent electrical and magnetic properties of ZnFe_2O_4 nanoparticles synthesized by the combustion method: Comparison between aspartic acid and glycine as fuels / A. Shanmugavani, R. K. Selvan, S. Layek [et al.] // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2014. – Vol. 354. – P. 363–371. – DOI 10.1016/j.jmmm.2013.11.018
20. Kumar, E. R. The role of fuel concentration on particle size and dielectric properties of manganese substituted zinc ferrite nanoparticles / E. R. Kumar, R. Jayaprakash // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2014. – Vol. 366. – P. 33–39. – DOI 10.1016/j.jmmm.2014.04.023

21. Получение наноразмерных порошков оксида иттрия методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / С. С. Балабанов, В. В. Дроботенко, Е. М. Гавришук [и др.] // Вестник Нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 2. – С. 91–97. – URL: http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/99999999_West_2011_2/12.pdf (дата обращения: 17.07.2026).
22. Макропористые магнитные оксиды железа и их композиты для жидкофазного каталитического окисления / Е. К. Папынова, А. Д. Номеровский, А. С. Азон [и др.] // Журнал неорганической химии. – 2020. – Т. 65, № 11. – С. 1449–1460. – DOI 10.31857/S0044457X2011015X
23. Preparation of Zinc Ferrite by Solid State Method and Its Characterizations / S. S. Jadhav, V. Y. Salunke, S. H. Mujawar [et al.] // Macromolecular Symposia. – 2021. – Vol. 400, N 1. – Art. 2100070. – DOI 10.1002/masy.202100070

References

1. Pund S. N., Nagwade P. A., Nagawade A. V., Thopate S. R., Bagade A. V. Preparation techniques for zinc ferrites and their applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 60, part. 3, pp. 2194–2208. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.444>
2. Zhou X., Liu J., Wang C., Sun P., Hu X., Li X., Shimano K., Yamazoe N., Lu G. Highly sensitive acetone gas sensor based on porous ZnFe_2O_4 nanospheres. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, vol. 206, pp. 577–583. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.09.080>
3. Hemeda O. M., Mostafa N. Y., Abd Elkader O. H., Hemeda D. M., Tawfik A., Mostafa M. Electrical and morphological properties of magnetocaloric nano ZnNi ferrite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 394, pp. 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.05.059>
4. Yang Y., Liu X., Yang Y., Xiao W., Li Z., Xue D., Li F., Ding J. Synthesis of nonstoichiometric zinc ferrite nanoparticles with extraordinary room temperature magnetism and their diverse applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, vol. 1, no. 16, pp. 2875–2885. <https://doi.org/10.1039/c3tc00790a>
5. Bohra M., Alman V., Arras R. Nanostructured ZnFe_2O_4 : An Exotic Energy Material. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 5, P. 1286. <https://doi.org/10.3390/nano11051286>
6. Efremov V. V., Korneykov R. I., Aksenova S. V., Kravchenko O. E., Akhmetov O. I., Tananaev I. G., Shichalin O. O. Electrochemical properties of ZnFe_2O_4 synthesized by solid-state reaction. *Zhurnal neorganicheskoi khimii*, 2025, vol. 70, no. 2, pp. 181–190 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0044457X25020059>
7. Martinson K. D., Murashkin A. A. Photocatalytic and magnetic properties of zinc ferrite nanoparticles. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2025, vol. 95, no. 10, pp. 2021–2028 (in Russian). <https://doi.org/10.61011/JTF.2025.10.61355.84-24>
8. Tadjarodi A., Imani M., Salehi M. ZnFe_2O_4 nanoparticles and clay encapsulated ZnFe_2O_4 nanocomposite: synthesis strategy, structural characteristics and adsorption of dye pollutants in water. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, no. 69, pp. 56145–56156. <https://doi.org/10.1039/c5ra02163d>
9. Xu Q., Feng J., Li L., Xiao Q., Wang J. Hollow $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ composites: High-performance and recyclable visible-light photocatalyst. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 641, pp. 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.04.076>
10. Arimi A., Megatiff L., Granone L. I., Dillert R., Bahnemann D. W. Visible-light photocatalytic activity of zinc ferrites. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2018, vol. 366, pp. 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.03.014>
11. Ma Y., Wang Q., Xing S. Insight into the catalytic mechanism of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ for hydrogen peroxide activation under visible light. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, vol. 529, pp. 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.03.014>
12. Egorova M. A. *Technology of polyfunctional oxy-compounds based on ferrites and chromites of transition elements*. Novochoerkassk, SRSPU, 2021. 165 p. (in Russian).

13. Pullar R. C. Hexagonal Ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. *Progress in Materials Science*, 2012, vol. 57, pp. 1191–1334. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.04.001>
14. Hajalilou A., Mazlan S. A. A review on preparation techniques for synthesis of nanocrystalline soft magnetic ferrites and investigation on the effects of microstructure features on magnetic properties. *Applied Physics A*, 2016, vol. 122, p. 680. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0217-2>
15. Masthoff I.-C., Kraken M., Mauch D., Menzel D., Munevar J. A., Baggio Saitovitch E., Litterst F. J., Garnweitner G. Study of the growth process of magnetic nanoparticles obtained via the non-aqueous sol-gel method. *Journal of Materials Science*, 2014, vol. 49, no. 14, pp. 4705–4714. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8160-0>
16. Guo P., Cui L., Wang Y., Lv M., Wang B., Zhao X. S. Facile synthesis of ZnFe_2O_4 nanoparticles with tunable magnetic and sensing properties. *Langmuir*, 2013, vol. 29, no. 28, pp. 8997–9003. <https://doi.org/10.1021/la401627x>
17. Chauhan L., Shukla A. K., Sreenivas K. Dielectric and magnetic properties of Nickel ferrite ceramics using crystalline powders derived from DL alanine fuel in sol-gel auto-combustion. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, no. 7, pp. 8341–8351. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.03.014>
18. Yadav R. S., Havlica J., Masilko J., Tkacz J., Kuritka I., Vilcakova J. Anneal-tuned structural, dielectric and electrical properties of ZnFe_2O_4 nanoparticles synthesized by starch-assisted sol-gel auto-combustion method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016, vol. 27, no. 6, pp. 5992–6002. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4522-5>
19. Shanmugavani A., Selvan R. K., Layek S., Sanjeeviraja C. Size dependent electrical and magnetic properties of ZnFe_2O_4 nanoparticles synthesized by the combustion method: Comparison between aspartic acid and glycine as fuels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, vol. 354, pp. 363–371. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.11.018>
20. Kumar E. R., Jayaprakash R. The role of fuel concentration on particle size and dielectric properties of manganese substituted zinc ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, vol. 366, pp. 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.04.023>
21. Balabanov S. S., Drobotenko V. V., Gavrishchuk E. M., Permin D. A. Production of nanosized yttrium oxide powders by self-propagating high-temperature synthesis. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo*, 2011, no. 2, pp. 91–97. Available at: http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/99999999_West_2011_2/12.pdf (accessed 17 July 2026) (in Russian).
22. Papynova E. K., Nomerovskii A. D., Azon A. S., Glavinskaya V. O., Buravlev I. Yu., Ognev A. V., Samardak A. S., Dran'kov A. N., Krasitskaya S. G., Tananaev I. G. Macroporous magnetic iron oxides and their composites for liquid-phase catalytic oxidation. *Zhurnal neorganicheskoi khimii*, 2020, vol. 65, no. 11, pp. 1449–1460 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0044457X2011015X>
23. Jadhav S. S., Salunke V. Y., Mujawar S. H., Bhongale S. R., Jadhav C. H. Preparation of Zinc Ferrite by Solid State Method and Its Characterizations. *Macromolecular Symposia*, 2021, vol. 400, no. 1, Art. 2100070. <https://doi.org/10.1002/masy.202100070>

Поступила 02.09.2026 г.