

Морфологические и структурные различия наночастиц магнетита, синтезированных методом жидкофазного горения при использовании различных топлив

А. Кенешбекова^{1*}, Б. Кайдар¹, А. Имаш^{1,2}, А. Ильянов^{2,3}, Э. Енсен^{2,3},
Р. Кажданбеков^{2,3}, А. Лесбаев³, Г. Смагулова¹

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

³Satbayev University, ул. Сатпаева, 22а, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследованы морфологические и структурные особенности наночастиц магнетита, синтезированных методом жидкофазного горения с использованием различных топлив – мочевины и глицина. Полученные результаты показали значительные различия в морфологии и кристалличности наночастиц в зависимости от типа топлива. Мочевина способствует формированию однородных и мелкодисперсных наночастиц с высокой степенью кристалличности, тогда как глицин приводит к образованию агломерированных частиц с примесями оксида углерода. Результаты рентгенофазового анализа подтвердили успешное получение магнетита с различной степенью кристалличности и неодинаковым фазовым составом, зависящим от использованного топлива. Выбор топлива показал значительное влияние на качество и свойства наночастиц магнетита, что подчеркивает необходимость оптимизации условий синтеза для различных приложений.

Ключевые слова: наночастицы магнетита, жидкофазное горение, самовоспламенение, глицин, мочевины

1. Введение

Магнетит (Fe_3O_4), известный с античных времен как первый материал с магнитными свойствами, нашел широкое применение в современном мире благодаря своим уникальным физико-химическим характеристикам [1, 2]. Наночастицы магнетита обладают выдающимися магнитными свойствами, стабильностью в химических реакциях и хорошей совместимостью с биологическими системами, что делает их важными для медицинских и технологических приложений [3-7]. В биомедицине магнетит используется для магнитно-резонансной томографии, гипертермии и таргетированной доставки лекарств [3, 7]. В каталитических процессах магнетит востребован из-за своей высокой поверхностной активности и способности разделения с помощью магнитного поля [8, 9]. Он также критичен для производства магнитных носителей информации и электронных

устройств [10-13]. Стоит отметить, что магнетит является объектом фундаментальных исследований в нанотехнологиях, материаловедении и физике твердого тела, способствуя развитию новых технологий и материалов, подчеркивая его актуальность и перспективность в современных исследованиях и промышленных применениях [2].

Для эффективного промышленного производства магнетита необходимо выбрать подходящий метод синтеза, поскольку его свойства зависят от структуры и процесса синтеза. Различные методы синтеза, такие как гидротермальный [14], сольвотермальный [15], сонохимический [16], золь-гель [17] и методы осаждения [18], имеют свои особенности и преимущества, но также требуют оптимизации условий для достижения желаемых характеристик наночастиц (табл. 1).

В этом контексте метод жидкофазного горения является перспективным подходом для синтеза магнетита. Этот метод основан на экзотермических реакциях в растворах с окислителями, такими как нитраты, сульфаты и карбонаты, с использованием органических топлив, например

*Ответственный автор

E-mail: a.keneshbekova@icp.kz

Таблица 1. Методы синтеза магнетита

Метод синтеза	Преимущества	Недостатки	Источник
Гидротермальный метод	Точный контроль морфологии, высокие давление и температура	Энергозатратность, требовательность к оборудованию	[14]
Сольвотермальный метод	Высокая кристалличность и монодисперсность	Высокие затраты, снижение удельной намагниченности	[15]
Сонохимический метод	Регулировка формы и размера	Неоднородные размеры, ограниченная стабильность	[16]
Метод золь-геля	Сложный процесс, хорошая намагниченность	Варьирующийся размер частиц, требуемая термическая обработка	[17]
Метод осаждения	Простота, безопасность	Низкая удельная намагниченность, влияние pH на морфологию	[18]
Метод жидкофазного горения	Простота, экономически выгодный, легко масштабируемый	Влияние топлива на качество и структуру продукта	[19]

мочевина, глицин, лимонная кислота и сахароза. Реакции горения приводят к выделению тепла и молекулярному смешиванию, что обеспечивает формирование кристаллических многокомпонентных структур. Полученные порошки имеют губчатую и пенистую структуру за счет выделяющихся в ходе реакции горения газообразных продуктов, что улучшает их адсорбционные свойства. Характеристики порошка, такие как фаза, морфология, размер частиц и удельная поверхность, зависят от природы и содержания органического топлива. Органические топлива обеспечивают атомы углерода, водорода и азота для горения, способствуя гомогенному перемешиванию катионов в растворах-прекурсорах [18-20]. Этот метод отличается простотой выполнения и не требует сложных химических или процедурных условий.

Метод жидкофазного горения имеет преимущества с точки зрения экономической целесообразности, легкости в масштабировании и высокой характеристикой получаемых наночастиц магнетита, что позволяет применять их в различных областях. Однако на качество магнетита при его синтезе методом жидкофазного горения значительно влияет вид применяемого топлива. Необходимо выбрать оптимальное топливо, позволяющее синтезировать дисперсные и однородные наночастицы. Морфология магнетита является важным фактором его дальнейшего применения, поскольку от его структуры зависит его эффективность в различных сферах.

Таким образом, в данной работе исследованы наночастицы Fe_3O_4 , полученные методом жидкофазного горения с использованием двух раз-

личных топлив. Определено влияние топлива на морфологию наночастиц магнетита. Исследование влияния различных методов и условий синтеза на морфологию и свойства магнетита является ключевым направлением для его дальнейшего усовершенствования и расширения области применения.

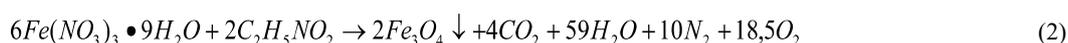
2. Экспериментальная часть

2.1. Материалы

Для синтеза наночастиц магнетита использовались следующие материалы: наногидрат нитрата железа (III) ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$), мочевина ($(NH_2)_2CO$), глицин ($C_2H_5NO_2$), магнитная мешалка (ISOLAB), лабораторная плитка.

2.2. Синтез наночастиц Fe_3O_4 методом жидкофазного горения

Наночастицы Fe_3O_4 были синтезированы методом жидкофазного горения с использованием мочевины и глицина в качестве топлива. Для синтеза использовались нитрат железа ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) и топливо при мольном отношении $\varphi = 2$. 7,775 г мочевины и 15,706 г нитрата железа, которые отдельно растворяли в 10 мл дистиллированной воды. После этого раствор нитрата железа был смешан с раствором мочевины в термостойкой емкости. Затем емкость ставили на предварительно нагретую до 250 °C плитку и постепенно увеличивали температуру до достижения 500 °C (рис. 1). Вторую смесь готовили с 1,994 г глицина при тех же условиях. Реакции между наногидратом нитрата железа и мочевиной или глицином протекают следующим образом:



В процессе жидкофазного горения часть воды испаряется, после чего образуется гель. Дальнейшее нагревание приводит к спонтанному и интенсивному самовоспламенению, в результате чего формируются наночастицы магнетита.

2.3. Методы исследования

2.3.1. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Для изучения структуры, размеров и морфологии образцов использовали сканирующий электронный микроскоп FESEM (Carl Zeiss, Германия), оснащенный системой энергодисперсионного рентгеноструктурного анализа (ЭДРС, EDS Oxford Instruments с программным обеспечением Aztec), позволяющим определять химический состав в диапазоне от В до U. ЭДРС-анализ использовался для определения химического состава и количественных данных наночастиц магнетита. Анализ был проведен в лаборатории электронной микроскопии Core facilities (Назарбаев Университет, Астана, Казахстан). Микроструктуру поверхности исследовали автоматическим цифровым оптическим микроскопом Leica DM 600 M с увеличением от 150 до 1500 раз. Метод позволяет получить изображение поверхности, определить структуру материала и размер отдельных частиц.

2.3.2. Рентгенофазовый анализ (РФА)

Кристаллическая структура образцов наноматериала была исследована методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре X'Pert

PRO MPD PANalytical B.V. с использованием $\text{CuK}\alpha$ излучения при напряжении 40 кВ и силе тока 40 мА в диапазоне 2θ от 5° до 90° . Были получены данные о кристаллической решетке, фазовом составе и степени аморфности образцов. Анализ и обработку данных проводили с использованием базы данных PDF.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Морфологические характеристики наночастиц Fe_3O_4

Морфологические особенности наночастиц магнетита, полученных методом жидкофазного горения с использованием мочевины и глицина в качестве топлива, были подробно изучены с помощью метода СЭМ. Определение химического состава, количественных данных наночастиц магнетита и картирование осуществляли методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДРС).

В процессе синтеза наночастиц магнетита методом жидкофазного горения с использованием двух различных топлив (мочевина и глицин) наблюдались значительные различия в характере горения. При использовании мочевины происходило интенсивное самовоспламенение и быстрое горение (рис. 1), что приводило к быстрому образованию наночастиц. В то время как при использовании глицина выделялось большое количество газов, предположительно газов азота, и наблюдалось сравнительно медленное горение. Эти различия в характере горения существенно влияют на морфологию и структуру получаемых наночастиц.

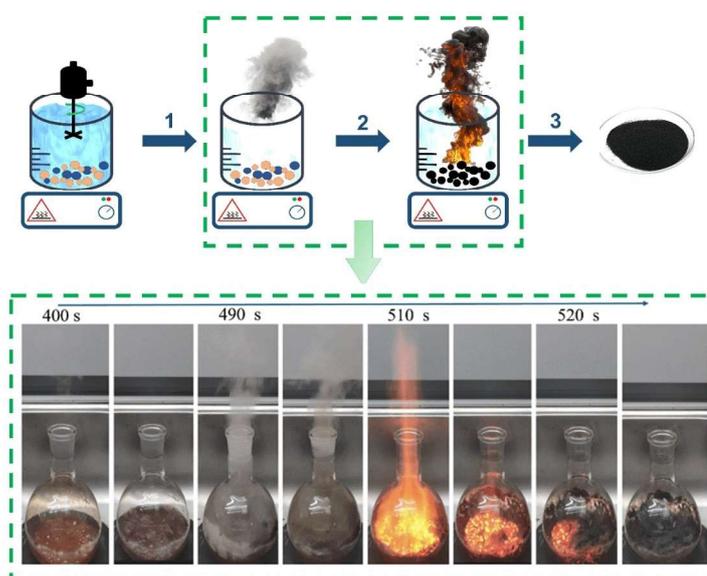


Рис. 1. Схема синтеза и фотографии процесса жидкофазного горения.

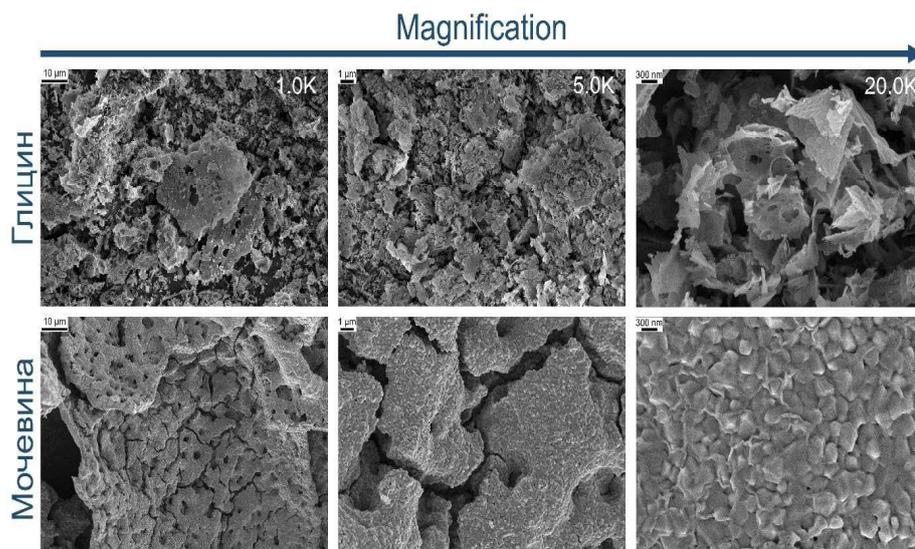


Рис. 2. СЭМ-снимки частиц магнетита при различных магнификациях.

Изображения СЭМ (рис. 2) показывают значительные различия в морфологии наночастиц магнетита, синтезированных с использованием различных топлив. Наночастицы, синтезированные с использованием глицина, обладают крупной, пористой и агломерированной структурой. В свою очередь, наночастицы, полученные с использованием мочевины, имеют более однородную и мелкодисперсную структуру. Несходства структур наночастиц могут быть объяснены различием в механизмах горения и выделением газов при использовании разных топлив. Распределение размера частиц магнетита, получен-

ных с использованием мочевины, показывает, что средний размер частиц составляет примерно 102,15 нм. Однако для образцов, полученных с использованием глицина, расчет размеров частиц некорректен из-за их агломерированной и неоднородной структуры. В таблице 2 представлены сравнительные данные по среднему размеру частиц магнетита, синтезированных различными методами и условиями.

Из таблицы 2 видно, что методы с низкими температурами, такие как осаждение и сонохимический синтез, приводят к образованию наночастиц меньшего размера обычно в диапазоне от

Таблица 2. Влияние методов синтеза Fe_3O_4 на размер частиц

Метод	Температура реакции (°C)	Средний размер частиц (нм)	Фактор контроля размера	Источники
Золь-гель	35-95 (темп. прокалики 450)	20-79	Концентрация прекурсора, время процесса	[21]
Гидротермальный	120-160 (темп. сушки 60)	23-107	Концентрация реагентов, состав растворителя	[22]
Сольвотермический	180 (темп. сушки 60)	54-86	Состав растворителя, время процесса, температура и давление	[23]
Сонохимический	25 (темп. промывки 100)	12-15	Время облучения, интенсивность, частота ультразвука, температура	[24]
Осаждение	35-65 (темп. сушки 75)	10-32	pH раствора, время процесса, температура	[25]
Жидкофазное горение	80-250	100-300	Тип топлива: бромид цетилтриметиламмония	[26]
Жидкофазное горение	250-500	70-160	Топливо: мочевины	Эта работа
Жидкофазное горение	250-500	-	Топливо: глицин	Эта работа

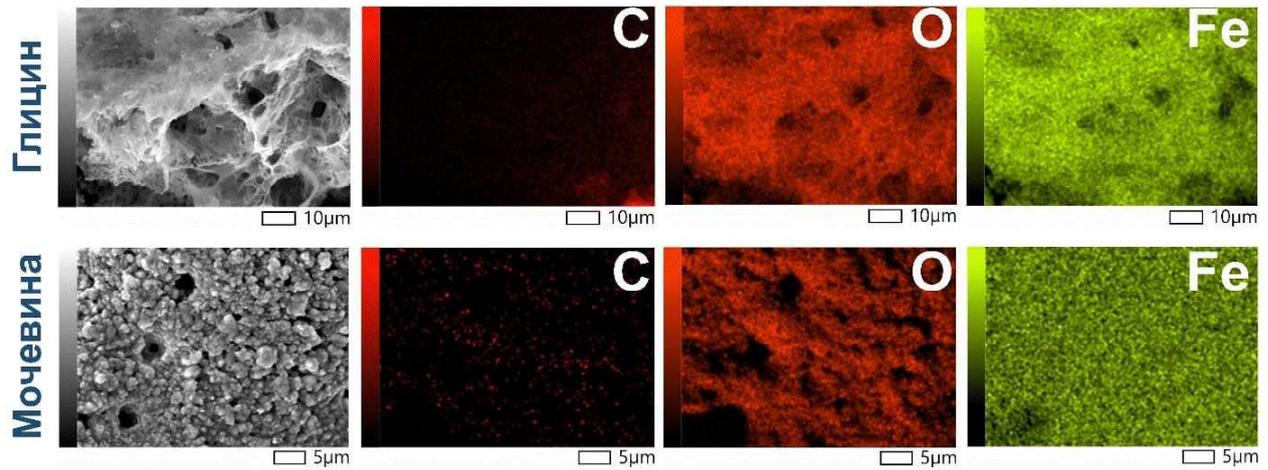


Рис.3. ЭДРС-картирование элементов в наночастицах магнетита, синтезированных с использованием глицина и мочевины.

8 до 32 нм и 12 до 15 нм, соответственно. В то же время методы с более высокими температурами, такие как гидротермальный и золь-гель синтез, позволяют получить более крупные частицы размером до 107 нм и 79 нм, соответственно. Жидкофазное горение с использованием мочевины и глицина демонстрирует, что топливо также играет важную роль в формировании конечного размера частиц: мочевина приводит к образованию частиц размером около 102,15 нм, в то время как глицин требует дальнейших исследований для точного определения размера частиц.

Таким образом, Вангом и коллегами [27] сообщается, что повышение температуры синтеза способствует росту наночастиц магнетита и изменению их кристаллической фазы. С повышением температуры наблюдается переход от $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ к Fe_3O_4 , а затем к FeO , поскольку температура

оказывает влияние на фазовый состав продукта. Отмечается, что при более низких температурах (300-400 °C) наблюдаются мелкие и дисперсные наночастицы магнетита размером около 10-20 нм. Однако при таких температурах иницирование горения затруднено и реакция может протекать медленно и неполноценно. В то же время температуры в диапазоне 400-500 °C обеспечивают более стабильное и интенсивное горение, способствуя формированию однородных и высококристаллических наночастиц магнетита с размером более 50 нм.

ЭДРС-картирование (рис. 3) демонстрирует распределение элементов углерода, кислорода и железа в наночастицах магнетита, синтезированных с использованием глицина и мочевины. На рисунке видно, что элементы равномерно распределены в образцах, однако наночастицы, синте-

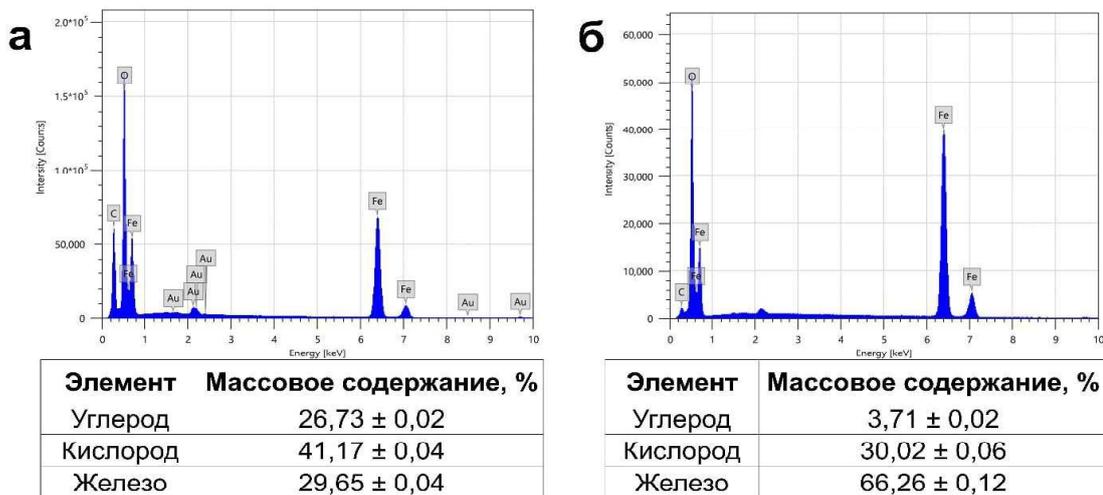


Рис. 4. ЭДРС-анализ массового содержания элементов в наночастицах магнетита, синтезированных с использованием (а) глицина и (б) мочевины.

зированные с использованием мочевины, имеют более плотное распределение железа, что подтверждает их высокую степень кристалличности и однородности.

Анализ методом ЭДРС (рис. 4) показывает массовое содержание элементов в наночастицах магнетита. Образцы, синтезированные с использованием глицина (а), содержат 26,73% углерода, 41,17% кислорода и 29,65% железа. Образцы, синтезированные с использованием мочевины (б), содержат 3,71% углерода, 30,02% кислорода и 66,26% железа. Эти результаты подтверждают, что синтез с использованием мочевины приводит к получению наночастиц с более высоким содержанием железа и, соответственно, более высокой кристалличностью.

3.2 Структурные особенности наночастиц Fe_3O_4

Результаты рентгенофазового анализа наночастиц магнетита, синтезированных с использованием мочевины и глицина в качестве топлива, позволили детально изучить их кристаллическую структуру и фазовый состав. Основные пики на рентгенограммах (рис. 5) соответствуют магнетиту (PDF #01-085-8559 и PDF #01-088-4625), что подтверждает успешное получение высококристаллического магнетита в обоих случаях. Однако наблюдаются различия в интенсивности и четкости пиков, что указывает на влияние типа топлива на структурные особенности полученных наночастиц. Для образцов, синтезированных с использованием мочевины, рентгенограммы демонстрируют более четкие и интенсивные пики, что свидетельствует о высокой степени кристалличности. Основные пики соответствуют магнетиту,

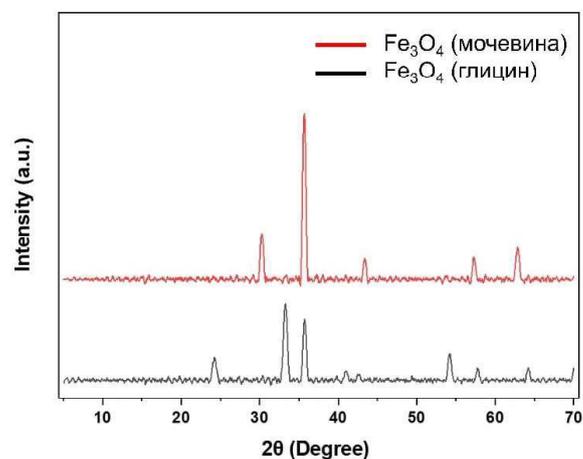


Рис. 5. Рентгенограммы наночастиц Fe_3O_4 , синтезированных с использованием глицина и мочевины.

однако присутствуют и дополнительные фазы, такие как оксид железа (PDF #01-071-6337) и гематит (PDF #01-089-0599). Эти дополнительные фазы могут быть связаны с примесями, образующимися в процессе синтеза, и указывают на сложность контроля чистоты фаз при использовании данного топлива.

В случае синтеза с использованием глицина рентгенограммы также подтверждают наличие высококристаллического магнетита, однако пики менее интенсивны по сравнению с образцами, синтезированными с мочевиной. Это может указывать на несколько меньшую степень кристалличности или наличие большего количества аморфных фаз. Присутствие оксида углерода (PDF #00-046-1039) в составе дополнительных фаз указывает на возможные примеси, возникающие при использовании глицина в качестве топлива, что может быть связано с особенностями его горения и выделением газов.

Анализ данных РФА показывает, что выбор топлива оказывает значительное влияние на фазовый состав и степень кристалличности наночастиц магнетита. Мочевина обеспечивает более интенсивное и равномерное горение, что способствует получению наночастиц с более высокой степенью кристалличности и меньшим количеством аморфных фаз. В то время как использование глицина приводит к образованию примесей, таких как оксид углерода, что может ухудшать структурные характеристики наночастиц. Таким образом, результаты рентгенофазового анализа подчеркивают важность оптимизации условий синтеза, включая выбор подходящего топлива, для получения наночастиц магнетита с желаемыми структурными свойствами. Высокая степень кристалличности и минимизация примесей являются ключевыми факторами для улучшения функциональных характеристик наночастиц и их дальнейшего применения в различных областях, таких как биомедицина, катализ и хранение данных.

4. Заключение

В данной работе был проведен сравнительный анализ морфологических и структурных особенностей наночастиц магнетита, синтезированных методом жидкофазного горения с использованием мочевины и глицина в качестве топлива. Результаты показали, что характер горения и выделение газов существенно влияют на морфологию и структуру наночастиц. При использовании мочевины образуются наночастицы с более однородной и мелкодисперсной структурой, в

то время как глицин приводит к формированию крупных и агломерированных частиц. Рентгенофазовый анализ подтвердил высокую степень кристалличности образцов, синтезированных с мочевиной, что связано с более интенсивным и равномерным горением. Образцы, полученные с использованием глицина, содержат примеси оксида углерода, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации условий синтеза. Таким образом, выбор топлива является ключевым фактором, влияющим на качество и свойства получаемых наночастиц магнетита. Эти результаты подчеркивают важность тщательного контроля условий синтеза для достижения желаемых характеристик наноматериалов.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК по грантовому проекту AP19576899.

Список литературы

- [1]. Métioui A. Brief Historical Review about Magnetism: From the Ancient Greeks up the Beginning of the XXth Century // *Journal ISSN*. – 2022. – Vol. 2766. – P. 2276.
- [2]. Niculescu A.G., Chircov C., Grumezescu A.M. Magnetite nanoparticles: Synthesis methods—A comparative review // *Methods*. – 2022. – Vol. 199. – P. 16-27.
- [3]. Rukhsar M., Zubair A., Abdur R., Hassan Z., Mujeeb U., Hassan A.H. An overview of iron oxide (Fe₃O₄) nanoparticles: from synthetic strategies, characterization to antibacterial and anticancer applications // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12(12). – P. 1809.
- [4]. Shukla S., Khan R., Daverey A. Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles, and their applications in wastewater treatment: A review // *Environmental Technology & Innovation*. – 2021. – Vol. 24. – P. 101924.
- [5]. Nguyen M.D. Tran H., Xu S., Lee R. Fe₃O₄ nanoparticles: structures, synthesis, magnetic properties, surface functionalization, and emerging applications // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11(23). – P. 11301.
- [6]. Ganapathe L.S., Mohamed M.A., Yunus R.M., Berhanuddin D.D. Magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles in biomedical application: From synthesis to surface functionalisation // *Magnetochemistry*. – 2020. – Vol. 6(4). – P. 68.
- [7]. Rezaei B., Yari P., Sanders S.M., Wang H., Chugh V.K., Liang S., Mostufa S., Xu K., Wang J.P., Jenifer G. P., Wu K. Magnetic nanoparticles: a review on synthesis, characterization, functionalization, and biomedical applications // *Small*. – 2024. – Vol. 20(5). – P. 2304848.
- [8]. Roy S.D., Das K.C., Dhar S.S. Conventional to green synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles; its application as catalyst, photocatalyst and toxicity: A short review // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2021. – Vol. 134. – P. 109050.
- [9]. Liu M., Ye Y., Ye J., Gao T., Wang D., Chen G., Song Z. Recent advances of magnetite (Fe₃O₄)-based magnetic materials in catalytic applications // *Magnetochemistry*. – 2023. – Vol. 9(4). – P. 110.
- [10]. Roostae M., Sheikhshoae I. Magnetic nanoparticles; synthesis, properties and electrochemical application: a review // *Current Biochemical Engineering*. – 2020. – Vol. 6(2). – P. 91-102.
- [11]. Kulpa-Koterwa A., Ossowski T., Niedziakowski P. Functionalized Fe₃O₄ nanoparticles as glassy carbon electrode modifiers for heavy metal ions detection – a mini review // *Materials*. – 2021. – Vol. 14(24). – P. 7725.
- [12]. Jjagwe J., Olupot P.W., Kulabako R., Carrara S. Electrochemical sensors modified with iron oxide nanoparticles/nanocomposites for voltammetric detection of Pb (II) in water: A review // *Heliyon*. – 2024.
- [13]. Ershadi M., Javanbakht M., Kiaei Z., Torkzaban H., Mozaffari S.A., Ajdari F.B. A patent landscape on Fe₃O₄/graphene-based nanocomposites in lithium-ion batteries // *Journal of Energy Storage*. – 2022. – Vol. 46. – P. 103924.
- [14]. Rafie S.F., Sayahi H., Abdollahi H., Abu-Zahra N. Hydrothermal synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles at different pHs and its effect on discoloration of methylene blue: evaluation of alternatives by TOPSIS method // *Materials Today Communications*. – 2023. – Vol. 37. – P. 107589.
- [15]. Ni X., Zhang J., Zhao L., Wang F., He H., Dramou P. Study of the solvothermal method time variation effects on magnetic iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) features // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2022. – Vol. 169. – P. 110855.
- [16]. Dheyab M.A., Aziz A.A., Jameel M.S., Khaniabadi P. M., Mehrdel B. Mechanisms of effective gold shell on Fe₃O₄ core nanoparticles formation using sonochemistry method // *Ultrasonics sonochemistry*. – 2020. – Vol. 64. – P. 104865.
- [17]. Yulfriska N., Affandi Z., Dwiridal L., Ramli R. Microwave absorption properties of Fe₃O₄/PANi nanocomposites synthesized by sol-gel methods // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. – 2020. – Vol. 1481(1). – P. 012006.
- [18]. Granath T., Löbmann P., Mandel K. Oxidative Precipitation as a Versatile Method to Obtain Ferromagnetic Fe₃O₄ Nano- and Mesocrystals Adjustable in Morphology and Magnetic Properties

- // Particle & Particle Systems Characterization. – 2021. – Vol. 38(3). – P. 2000307.
- [19]. Said M., Hariani P.L., Apriani I. Solution combustion method to synthesize magnetic Fe₃O₄ as photocatalytic of Congo red dye and antibacterial activity // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. – 2021. – Vol. 926(1). – P. 012050.
- [20]. Zhao J., Zhang H., He J., Zhou L., Luo C., Li X., Hu Y., Liu Y., Yang D., Cui X. Porous Mn-doped Fe₃O₄ as lithium-ion battery anode via low-temperature combustion synthesis // Vacuum. – 2023. – Vol. 218. – P. 112659.
- [21]. Hu P., Chang T., Chen W.J., Deng J., Li S.L., Zuo Y.G., Kang L., Yang F., Hostetter M., Volinsky A.A. Temperature effects on magnetic properties of Fe₃O₄ nanoparticles synthesized by the sol-gel explosion-assisted method // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 773. – P. 605-611.
- [22]. Torres-Gómez N., Nava O., Argueta-Figueroa L., García-Contreras R., Baeza-Barrera A., Vilchis-Nestor A. Shape tuning of magnetite nanoparticles obtained by hydrothermal synthesis: effect of temperature // Journal of Nanomaterials. – 2019. – Vol. 1. – P. 7921273.
- [23]. Zak A.K., Shirmahd H., Mohammadi S., Banihashemian S.M. Solvothermal synthesis of porous Fe₃O₄ nanoparticles for humidity sensor application // Materials Research Express. – 2020. – Vol. 7(2). – P. 025001.
- [24]. Rahmawati R., Kaneti Y.V., Taufiq A., Sunaryono Yulianto B., Suyatman N., Kurniadi D., Hossain M.S.A., Yamauchi Y. Green synthesis of magnetite nanostructures from naturally available iron sands via sonochemical method // Bulletin of the Chemical Society of Japan. – 2018. – Vol. 91(2). – P. 311-317.
- [25]. Ba-Abbad M.M., Benamour A., Ewis D., Mohammad A.W., Mahmoudi E. Synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles with different shapes through a co-precipitation method and their application // Jom. – 2022. – Vol. 74(9). – P. 3531-3539.
- [26]. Hadadian S., Masoudpanah S.M., Alamolhoda S. Solution combustion synthesis of Fe₃O₄ powders using mixture of CTAB and citric acid fuels // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2019. – Vol. 32. – P. 353-360.
- [27]. Wang X., Qin M., Fang F., Jia B., Wu H., Qu X., Volinsky A.A. Effect of glycine on one-step solution combustion synthesis of magnetite nanoparticles // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 719. – P. 288-295.
- [3]. Rukhsar M, Zubair A, Abdur R, Hassan Z, Mujeeb U, Hassan AH (2022) Crystals 12(12): 1809. <https://doi.org/10.3390/cryst12121809>
- [4]. Shukla S, Khan R, Daverey A (2021) Environmental Technology & Innovation 24: 101924. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101924>
- [5]. Nguyen MD, Tran H, Xu S, Lee R (2021) Applied Sciences 11(23): 11301. <https://doi.org/10.3390/app112311301>
- [6]. Ganapathe LS, Mohamed MA, Yunus RM, Berhanuddin DD (2020) Magnetochemistry 6(4): 68. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040068>
- [7]. Rezaei B, Yari P, Sanders SM, Wang H, Chugh V K, Liang S, Mostufa S, Xu K, Wang JP, Jenifer GP, Wu K (2024) Small 20(5): 2304848. <https://doi.org/10.1002/smll.202304848>
- [8]. Roy SD, Das KC, Dhar SS (2021) Inorganic Chemistry Communications 134: 109050. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.109050>
- [9]. Liu M, Ye Y, Ye J, Gao T, Wang D, Chen G, Song Z (2023) Magnetochemistry 9(4): 110. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry9040110>
- [10]. Roostae M, Sheikhshoae I (2020) Current Biochemical Engineering 6(2): 91-102. <https://doi.org/10.2174/2212711906666200316163207>
- [11]. Kulpa-Koterwa A, Ossowski T, Niedziakowski P (2021) Materials 14(24): 7725. <https://doi.org/10.3390/ma14247725>
- [12]. Jjagwe J, Olupot PW, Kulabako R, Carrara S (2024) Heliyon. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29743>
- [13]. Ershadi M, Javanbakht M, Kiaei Z, Torkzaban H, Mozaffari SA, Ajdari FB (2022) Journal of Energy Storage 46: 103924. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103924>
- [14]. Rafie SF, Sayahi H, Abdollahi H, Abu-Zahra N (2023) Materials Today Communications 37: 107589. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107589>
- [15]. Ni X, Zhang J, Zhao L, Wang F, He H, Dramou P (2022) Journal of Physics and Chemistry of Solids 169: 110855. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2022.110855>
- [16]. Dheyab MA, Aziz AA, Jameel MS, Khaniabadi PM, Mehrdel B (2020) Ultrasonics sonochemistry 64: 104865. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104865>
- [17]. Yulfriska N, Affandi Z, Dwiridal L, Ramli R (2020) Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing 1481(1): 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1481/1/012006>
- [18]. Granath T, Löbmann P, Mandel K (2021) Particle & Particle Systems Characterization 38(3): 2000307. <https://doi.org/10.1002/ppsc.202000307>
- [19]. Said M, Hariani PL, Apriani I (2021) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing 926(1): 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/926/1/012050>

Reference

- [20]. Zhao J, Zhang H, He J, Zhou L, Luo C, Li X, Hu Y, Liu Y, Yang D, Cui X (2023) *Vacuum* 218: 112659. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112659>
- [21]. Hu P, Chang T, Chen WJ, Deng J, Li SL, Zuo YG, Kang L, Yang F, Hostetter M, Volinsky AA (2019) *Journal of Alloys and Compounds* 773: 605-611. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.238>
- [22]. Torres-Gómez N, Nava O, Argueta-Figueroa L, García-Contreras R, Baeza-Barrera A, Vilchis-Nestor A (2019) *Journal of Nanomaterials* 1: 7921273. <https://doi.org/10.1155/2019/7921273>
- [23]. Zak AK, Shirmahd H, Mohammadi S, Banihashemian SM (2020) *Materials Research Express* 7(2): 025001. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6e3c>
- [24]. Rahmawati R, Kaneti YV, Taufiq A, Sunaryono Yulianto B, Suyatman N, Kurniadi D, Hossain M SA, (2018) *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 91(2): 311-317. <https://doi.org/10.1246/bcsj.20170317>
- [25]. Ba-Abbad MM, Benamour A, Ewis D, Mohammad AW, Mahmoudi E (2022) *Jom* 74(9): 3531-3539. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05380-3>
- [26]. Hadadian S, Masoudpanah SM, Alamolhoda S (2019) *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 32: 353-360. <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4685-9>
- [27]. Wang X, Qin M, Fang F, Jia B, Wu H, Qu X, Volinsky AA (2017) *Journal of Alloys and Compounds* 719: 288-295. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.187>

Әртүрлі отынды қолдану арқылы сұйық фазалық жану әдісімен синтезделген магнетит нанобөлшектердің морфологиялық және құрылыстық айырмашылықтары

А. Кенешбекова^{1*}, Б. Қайдар¹, А. Имаш^{1,2}, А. Ильянов^{2,3}, Э. Енсеп^{2,3}, Р. Кажданбеков^{2,3}, А. Лесбаев³, Г. Смагулова¹

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к-сі, 172, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

³Satbayev University, Satpayev көшесі, 22а, Алматы, Қазақстан

АНДАТПА

Бұл жұмыста әртүрлі отындар — карбамид (несепнәр) мен глицинді қолдану арқылы сұйық фазалық жану әдісімен синтезделген магнетит нанобөлшектерінің морфологиялық және құрылымдық ерекшеліктері зерттелді. Алынған нәтижелер отын түріне байланысты нанобөлшектердің морфологиясы мен кристаллдылығында ай-

тарлықтай айырмашылықтар бар екенін көрсетті. Карбамид кристалдылығы жоғары біртекті және ұсақ нанобөлшектердің түзілуіне ықпал етеді, ал глицин көміртек оксиді қоспалары бар агломерацияланған бөлшектердің пайда болуына әкеледі. Рентгендік фазалық талдау нәтижелері пайдаланылған отынға байланысты кристалдылығы мен фазалық құрамы әртүрлі дәрежедегі магнетиттің табысты өндірілгенін растады. Отынды таңдау магнетит нанобөлшектерінің сапасы мен қасиеттеріне айтарлықтай әсер етіп, әртүрлі қолданбалар үшін синтез шарттарын оңтайландыру қажеттілігін көрсетті.

Түйін сөздер: магнетит нанобөлшектері, сұйық фазалық жану, өздігінен тұтану, глицин, карбамид

Morphological and structural differences of magnetite nanoparticles synthesized by solution combustion method using different fuels

A. Keneshbekova^{1*}, B. Kaidar¹, A. Imash^{1,2}, A. Ilyanov^{2,3}, E. Yensep^{2,3}, R. Kazhdanbekov^{2,3}, A. Lesbayev³, G. Smagulova¹

¹Institute of Combustion Problems, 172, Bogenbai batyr str., Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, 71, Al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

³Satbayev University, 22a Satpayev str., Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

This paper investigated the morphological and structural features of magnetite nanoparticles synthesized by solution combustion method using different fuels, urea and glycine. The obtained results have demonstrated significant differences in the morphology and crystallinity of the nanoparticles depending on the type of fuel. Urea promotes the formation of homogeneous and finely dispersed nanoparticles with a high degree of crystallinity, whereas glycine leads to the formation of agglomerated particles with carbon monoxide impurities. The results of X-ray phase analysis confirmed the successful production of magnetite with different degree of crystallinity and phase composition depending on the fuel used. The choice of fuel exhibited a significant influence on the quality and properties of magnetite nanoparticles, highlighting the need to optimize the synthesis conditions for different applications.

Keywords: magnetite nanoparticles, solution combustion, self-ignition, glycine, urea