

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА Mn -ЗАМЕЩЕННОГО МАГНЕТИТА ДЛЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024 г. Ю. С. Гайдук^{а,*}, Е. В. Коробко^б, Л. В. Радкевич^б, Р. П. Голодок^а, А. Е. Усенко^а,
В. В. Паньков^а

^аБелорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, Минск, 220050 Беларусь

^бИнститут тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. Петруся Бровки, 17, Минск, 220072 Беларусь

*e-mail: j_hajduk@list.ru

Поступила в редакцию 14.02.2024 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 28.03.2024 г.

Методом соосаждения (с различными вариантами последующей термической и механической обработки осадка) синтезирован феррит железа(II)-марганца(II) состава $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$. Материал исследован методами рентгенофазового анализа, инфракрасной спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и магнетометрии. Порошок, прошедший на заключительном этапе синтеза обжиг в аргоне при 740°C (8.0 ч) и высокоэнергетический помол (1.0 ч), является перспективным функциональным наполнителем для магнито-реологических материалов благодаря высокому значению напряжения сдвига (3500 Па при 625 мТл) масляной суспензии, изготовленной на его основе, и высокой маслоемкости, обеспечивающей седиментационную стабильность суспензии.

Ключевые слова: феррит железа-марганца, магнито-реологические жидкости, ферритмагнетики

DOI: 10.31857/S0044457X24070049, **EDN:** XOOHVE

ВВЕДЕНИЕ

Ферритмагнитные микро- и наночастицы традиционно используются в качестве функционального компонента наполнителей магнито-реологических жидкостей (МРЖ) для магнитоуправляемых устройств. При создании таких материалов желательны как можно большие удельная намагниченность и напряжение сдвига суспензий при приложении магнитного поля и как можно меньшая коэрцитивная сила частиц [1–5]. МРЖ состоят из трех основных компонентов: магнитных частиц, жидкости-носителя и функциональных добавок. Компоненты могут смешиваться различными способами, в последнее время приготовление МРЖ часто ведется с применением ультразвукового воздействия [6]. В качестве наполнителя часто используют частицы карбонильного железа, поскольку они обладают наибольшими значениями магнитной проницаемости и намагниченности насыщения [5–9]. Известны также МРЖ на основе магнетита и ферритов различного химического состава, а также МРЖ с комплексными наполнителями, содержа-

щими частицы различной химической природы. В определенных условиях эксплуатации (величине приложенного магнитного поля, температуре, давлении) магнитные частицы различного состава могут проявлять синергетический эффект [3]. К МРЖ, независимо от области их применения, предъявляется ряд общих требований, в частности, определенная степень дисперсности частиц твердой фазы, хорошая смачиваемость дисперсионной среды, равномерное распределение частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде, агрегативная и седиментационная устойчивость, заданные реологические свойства (текучесть), способность к структурированию во внешнем магнитном поле [10].

Известны различные способы получения магнитных частиц: метод соосаждения, термолиз, золь-гель методы, синтез в мицеллах, сольвотермальный синтез и др. [11–17]. Метод соосаждения обладает очевидными преимуществами при масштабировании синтеза. Кроме того, высокая чувствительность метода к изменению внешних параметров (характер осадителя, концентрация

реагентов, температура синтеза, pH реакционной среды и т.д.) позволяет сравнительно легко варьировать размер и свойства частиц. Известно, что помимо химического состава заметное влияние на реологические свойства МРЖ оказывают размер частиц [18–20] и полидисперсность [21].

Цель настоящей работы состояла в получении и исследовании однофазных магнитных частиц $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ в качестве наполнителя МРЖ. Состав со степенью замещения марганцем $x = 0.3$ выбран как соответствующий порошку с наибольшим значением удельной намагниченности [5]. Принято считать, что при разработке оптимальных наполнителей МРЖ необходимо отдавать предпочтение материалам с высокими значениями удельной намагниченности и, по возможности, с низкими значениями коэрцитивной силы, чтобы повысить магнитоуправляемость жидкости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Твердый раствор $\text{Mn}_3\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ получен методом соосаждения при комнатной температуре из водных растворов соответствующих солей ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Все реактивы имели квалификацию “ч.”. Растворы солей железа брали в мольном соотношении $\text{Fe}^{3+} : \text{Fe}^{2+} = 2 : 1$. Навески $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (0.3703 г), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (4.9934 г), $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (1.7635 г) и NaOH (2.8746 г) растворяли в дистиллированной воде объемом 30, 50, 100, 150 мл соответственно. Растворы солей смешивали и при интенсивном перемешивании вливали в раствор NaOH (конечный pH 11). Осадок сушили на воздухе, затем проводили обжиг и помол в шаровом диспергаторе в различных условиях.

Исследование структуры полученных образцов выполняли методами рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-3.0; CoK_α -излучение, $1/78897 \text{ \AA}$), сканирующей электронной микроскопии (Leo 1420) и инфракрасной (ИК) спектроскопии (спектрометр Avatar 330, Thermo Nicolet). Размеры областей когерентного рассеяния (ОКР), соответствующие физическим размерам кристаллитов, определяли по уширению дифракционных рефлексов (метод Шеррера).

Рентгеновскую плотность рассчитывали по формуле:

$$d_x = \frac{8M}{a^2 N_A}, \quad (1)$$

где M — формальная молекулярная масса; a — параметр кристаллической решетки, $\text{\AA}$; N_A — число Авогадро.

Плотность дислокаций δ (число линий на 1 м^2) оценивали по формуле:

$$\delta = \frac{1}{D^2}, \quad (2)$$

где D — размер ОКР (размер кристаллитов).

Исследование магнитных характеристик проводили с помощью вибрационного магнетометра Cryogen Free Measurement System Cryogenic Ltd в поле с максимальной напряженностью 8 Тл.

Высокоэнергетический помол порошков производили в шаровом диспергаторе Retsch PM400 при скорости вращения 170 об/мин в течение 0.5 и 1.0 ч.

Магнитореологическую чувствительность наполнителей определяли на вискозиметре HAAKE RV12, оснащенный индуктором магнитного поля, с измерительной ячейкой типа пластина—пластина. Нижняя пластина вискозиметра изготовлена из немагнитной стали, верхняя — из магнитной. Тестирование образцов МРЖ проводили в постоянном магнитном поле с индукцией 62.5–625 мТл. Магнитореологические свойства жидкости определяли в фиксированном магнитном поле при изменении скорости сдвига от 0.01 до 536 с^{-1} . Магниточувствительность оценивали по изменению напряжения сдвига МРЖ при воздействии постоянного магнитного поля различной индукции.

Для проведения тестирования образец МРЖ готовили путем механического диспергирования, используя в качестве магниточувствительной дисперсной фазы частицы $\text{Mn}_3\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ (в различных вариантах синтеза) в количестве 20.0 мас. %, а в качестве жидкости-носителя — синтетическое масло Mobil 22. В качестве анти-седиментационной добавки применяли моноолеат глицерина в количестве 2.0 мас. %. Для увеличения распределения моноолеата глицерина по поверхности магнитных частиц его заранее растворяли в синтетическом масле. Предварительно просеянный порошок $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ вводили небольшими порциями при тщательном перетирании каждой из них.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Магнетит имеет кубическую гранецентрированную кристаллическую решетку, которая представляет собой плотнейшую упаковку

ионов кислорода. Катионы железа при этом располагаются в двух типах пустот, образующихся при укладке анионов. Это так называемые тетраэдрические и октаэдрические пустоты. Введение в кристаллическую решетку магнетита катионов других металлов может изменять его магнитные характеристики. При этом магнитные свойства образующихся твердых растворов непосредственно связаны с распределением катионов в кристаллической структуре [22]. В нашем предыдущем исследовании системы $M_xFe_{3-x}O_4$ ($x = 0-1.8$) было установлено, что зависимость удельной намагниченности насыщения от состава твердого раствора $M_xFe_{3-x}O_4$ в этом случае носит нелинейный характер [5]. Оказалось, что максимальная ее величина принадлежит составу $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ (рис. 1).

Все синтезированные в настоящей работе образцы $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ имеют структуру кубической шпинели. На рис. 2 представлены дифрактограммы и ИК-спектры исследованных порошков.

В табл. 1 приведены рентгеноструктурные характеристики твердого раствора $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ после сушки на воздухе (образец 1), обжига при 740°C (образец 2), обжига и высокоэнергетического помола на протяжении 0.5 (образец 3) и 1.0 ч (образец 4).

На основании данных рентгеноструктурного анализа установлено, что после обжига при

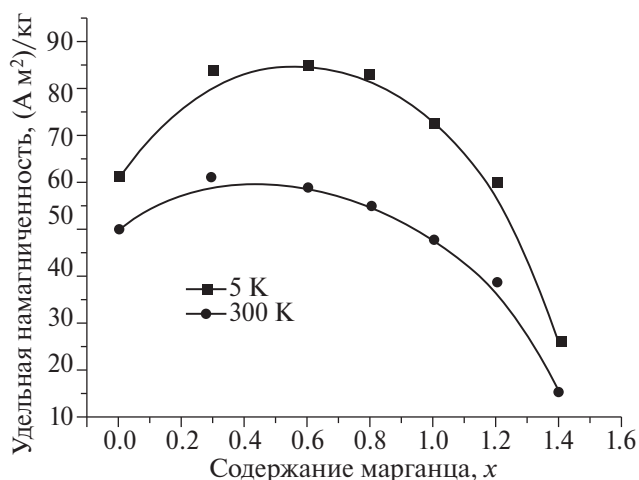


Рис. 1. Зависимость намагниченности насыщения $M_xFe_{3-x}O_4$ от степени замещения (x) при 5 и 300 K [5].

740°C происходит снижение как значения параметра элементарной ячейки a , так и ее объема V . После высокоэнергетического помола параметр элементарной ячейки, ее объем и рентгеновская плотность порошка практически не изменяются. Плотность дислокаций (δ) в порошках, подвергнутых обжигу и помолу, значительно меньше, чем в исходном порошке. Расчетный размер кристаллитов (областей когерентного рассеяния) в процессе обжига увеличивается в два раза (с 8 до 16 нм) и незначительно снижается после помола на протяжении 1.0 ч (табл. 1).

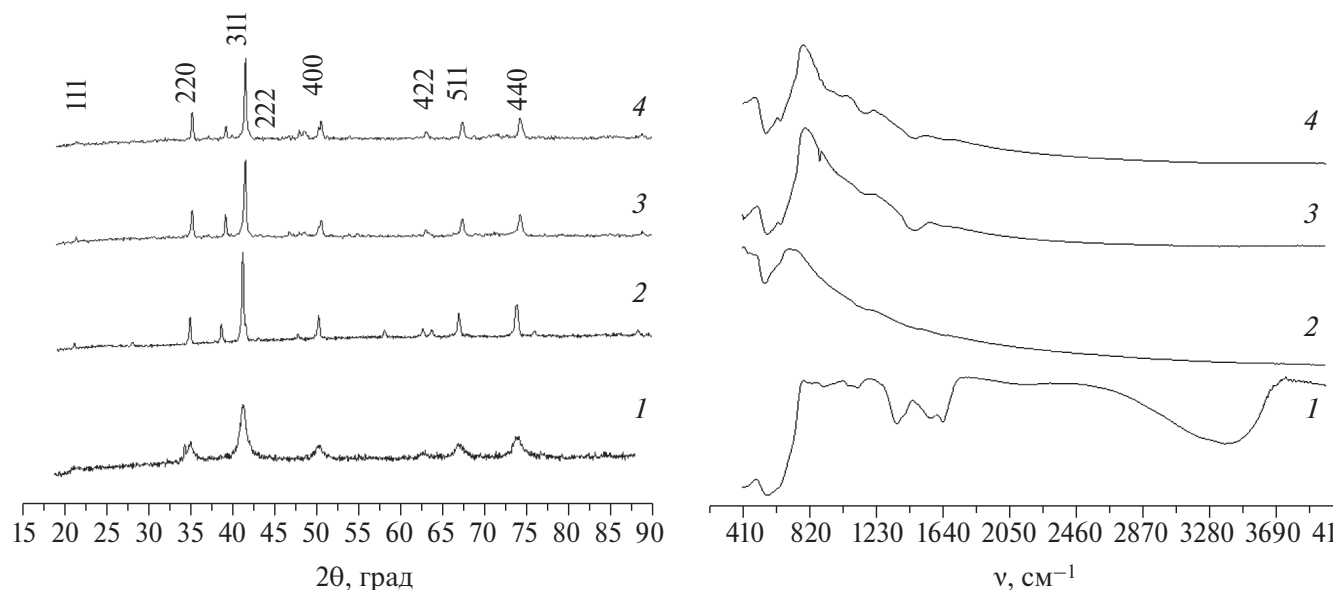


Рис. 2. Дифрактограммы (а) и ИК-спектры (б) порошков состава $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ после сушки при 120°C (1), обжига при 740°C (2), обжига при 740°C и последующего высокоэнергетического помола в течение 0.5 (3) и 1.0 ч (4).

Таблица 1. Рентгеноструктурные характеристики твердых растворов $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ (a — параметр кристаллической кубической решетки, V — объем элементарной ячейки, d — размер областей когерентного рассеяния, δ — плотность дислокаций, d_x — рентгеновская плотность)

№ образца	Условия получения	a , Å	$V \times 10^3$, нм ³	d , нм	$\delta \times 10^3$, дисл./см ²	d_x , г/см ³
1	Сушка 120°C	8.407	594	8	15.8	5.17
2	Обжиг 740°C	8.388	590	16	3.9	5.21
3	Обжиг 740°C + помол 0.5 ч	8.388	590	16	3.9	5.21
4	Обжиг 740°C + помол 1.0 ч	8.385	590	14	5.1	5.21

Примечание. На основе образца **1** была приготовлена МРЖ-1, на основе образца **2** — МРЖ-3, на основе образца **4** — МРЖ-4. МРЖ-2 была получена с помощью образца **1**, дополнительно обожженного при 300°C (2 ч).

Данные ИК-спектроскопии подтверждают формирование шпинельной структуры для всех составов. При введении катионов Mn^{2+} наблюдается смещение характеристических частот ν_1 (~ 560 см⁻¹) и ν_2 (~ 430 см⁻¹), относящихся к валентным колебаниям М—О в тетраэдрических и октаэдрических пустотах, в область меньших значений. Это обусловлено наличием комбинированных полос колебаний валентных связей Fe—О в октаэдрических позициях с ионами Mn^{2+} в ближайшем координационном окружении Fe—О—Mn, что является причиной увеличения длины связи ($l_{\text{MnO}} > l_{\text{FeO}}$) и изменения величины силовой постоянной [23, 24].

На рис. 3 представлены результаты магнитных измерений частиц $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ при 300 К после термической обработки порошка при 300 и 740°C. Как следует из рисунка, кривые намагничивания и размагничивания во всех случаях практически совпадают. Максимальное значение намагниченности насыщения при 300 К со-

ставляет 56.97 (Ам²)/кг для порошка, прошедшего термообработку на воздухе в течение 2.0 ч при 300°C, и 74.3 (Ам²)/кг для порошка после обжига в аргоне в течение 8.0 ч при 740°C. Образец, обожженный при 300°C в течение 2.0 ч, имеет коэрцитивную силу ~ 0.12 кЭ, а образец, обожженный при 740°C, — около 0.16 кЭ. Исходный порошок (образец **1**) при 300 К имеет нулевую коэрцитивную силу, т.е. является суперпарамагнитным (рис. 3а).

Для сравнения исследованные ранее [25] и рекомендованные для практического применения в качестве функционального наполнителя ферриты цинка-кобальта обладали максимальным значением намагниченности насыщения при 300 К 97.9 (Ам²)/кг и коэрцитивной силой ~ 0.1 кЭ.

Изучение магнитореологических характеристик суспензии, содержащей свежесажженный $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$, высушенный при 120°C (МРЖ-1),

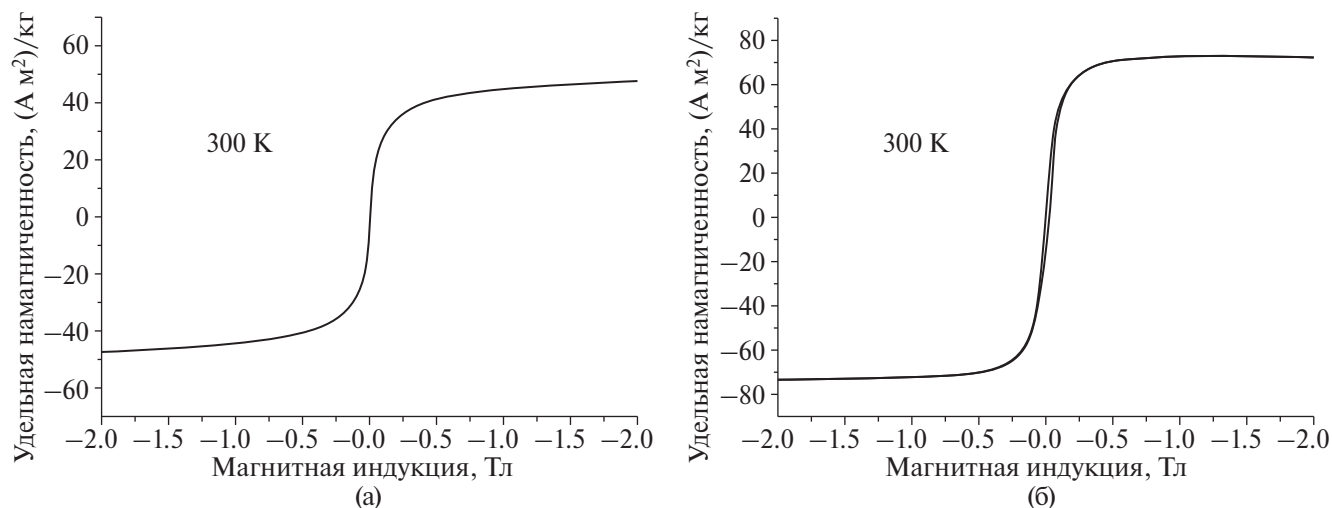


Рис. 3. Зависимости намагниченности насыщения $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ от напряженности магнитного поля: порошок после обжига на воздухе на протяжении 2.0 ч при 300°C (а), после обжига в аргоне на протяжении 8.0 ч при 740°C (б).

показало, что напряжение сдвига в магнитном поле с индукцией 625 мТл составляет ~ 330 Па при скорости сдвига 536 с^{-1} . Однако использование порошка, дополнительно обработанного при 300°C (МРЖ-2), позволило увеличить напряжение сдвига до 2100 Па при таких же условиях. С целью дальнейшего увеличения среднего размера частиц и, предположительно, напряжения сдвига магнитореологической суспензии был предпринят обжиг порошка при 740°C на протяжении 8.0 ч. Для предотвращения разложения материала на воздухе при высокотемпературном нагреве обжиг проводили в атмосфере аргона. Напряжение сдвига МРЖ-3 (рис. 4), изготовленной на основе обожженного таким образом образца $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$, составило ~ 4170 Па в магнитном поле с индукцией 625 мТл при скорости сдвига 536 с^{-1} (это значение превосходит аналогичное для исследованного ранее феррита кобальта-цинка, равное ~ 3500 Па) [23]). Далее был выполнен высокоэнергетический помол в шаровом диспергаторе на протяжении 0.5 ч. Изготовленная на основе молотого образца МРЖ-4 показала несколько меньшее напряжение сдвига, чем суспензия на основе образца без помола (МРЖ-3). При этом помол оказал положительное влияние на устойчивость МРЖ

за счет минимизации доли фракции крупных частиц ($>2 \text{ мкм}$) и уменьшения среднего размера частиц в целом. Количество и положение рефлексов на дифрактограмме порошка (рис. 2а) после помола на протяжении 0.5 и 1.0 ч не изменились. Однако, в отличие от дифрактограммы свежесозданного порошка (1), на всех других дифрактограммах (2–4) присутствует небольшой дополнительный рефлекс приблизительно одинаковой интенсивности при 39.1° , который может принадлежать $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (рефлекс с индексом $<104>$).

На рис. 4 представлены СЭМ-изображения порошка $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ до и после помола в шаровом диспергаторе. Как следует из рис. 4а, порошок после обжига характеризуется большим разбросом частиц по размеру (наряду с большим количеством частиц $\sim 500 \text{ нм}$ имеются крупные агломераты размером $>5 \text{ мкм}$). При этом, как видно из рис. 4б, крупные частицы могут представлять собой пористую (губчатую) структуру, которая формируется в результате спекания первоначально мелких осажженных из водного раствора частиц. После помола крупные агломераты в порошке отсутствуют, все частицы имеют размер $<2 \text{ мкм}$, при этом абсолютное большинство $<1 \text{ мкм}$ (рис. 4в).

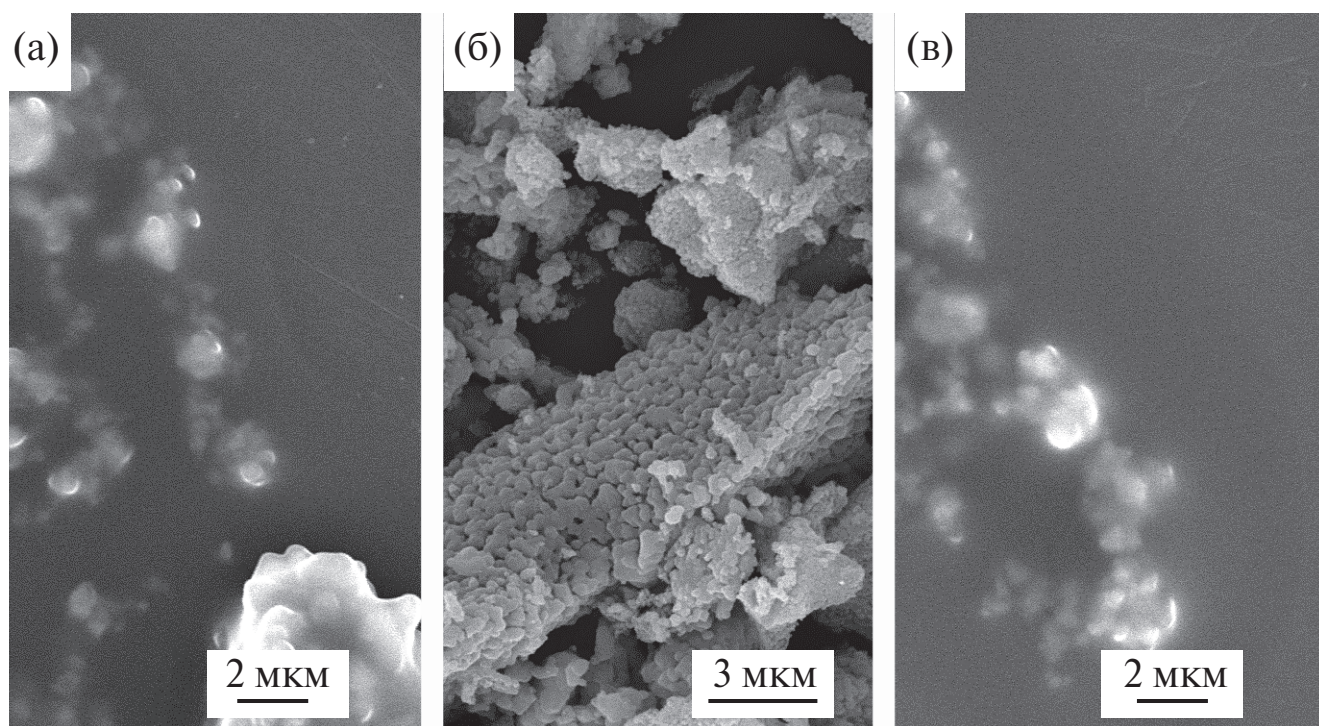


Рис. 4. СЭМ-изображения порошка $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ до (а, б) и после (в) высокоэнергетического помола в шаровом диспергаторе.

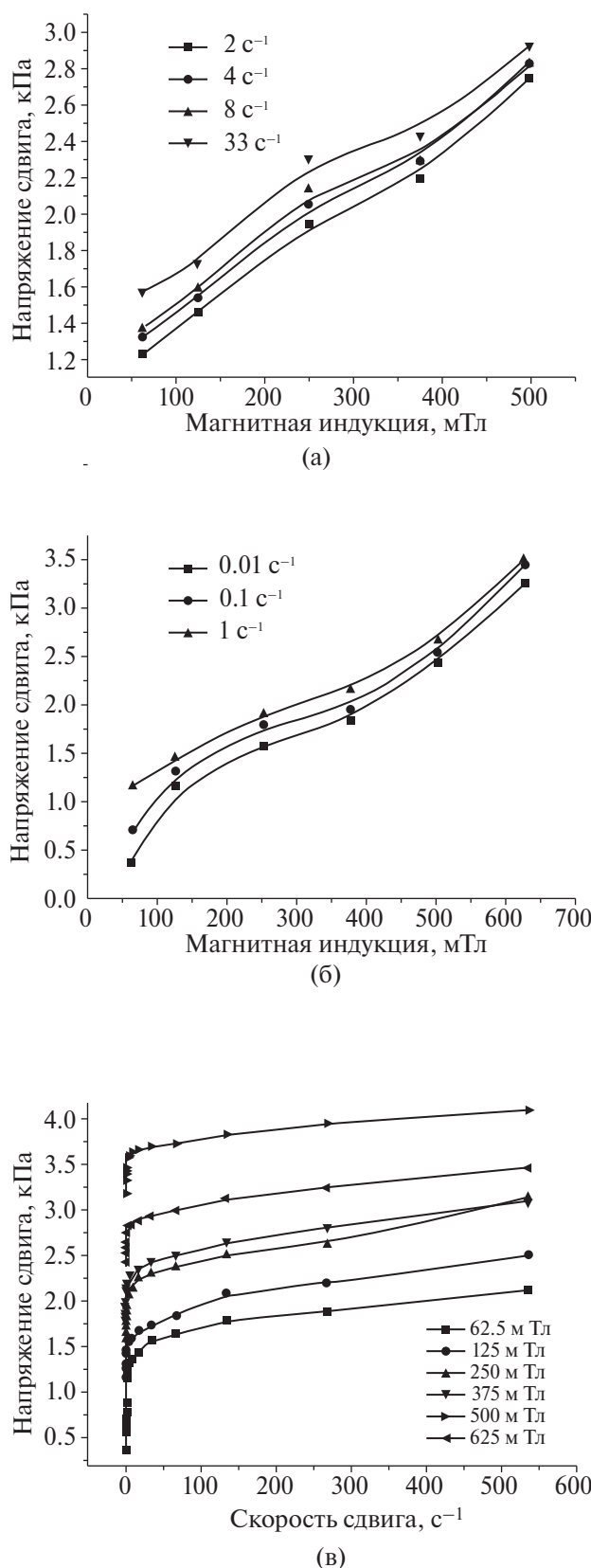


Рис. 5. Зависимости напряжения сдвига МРЖ-4 на основе $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ (после обжига при 740°C и помола в течение 1.0 ч) при различных скоростях сдвига и заданных значениях магнитной индукции (а, б) и кривые течения (в).

На рис. 5 представлены зависимости напряжения сдвига суспензий, изготовленных на основе $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ (после обжига и помола) в индустриальном масле Mobil 22 (20.0 мас. %).

Как видно из представленных на рис. 4 данных, с ростом индукции магнитного поля увеличивается напряжение сдвига. Однако при малых скоростях сдвига (рис. 4а) напряжение сдвига МРЖ-3 практически не зависит от его скорости и состояние жидкости ближе к пластичному, а при увеличении скорости сдвига (рис. 4б) характер течения более соответствует вязкопластичному. Общий вид кривых течения (рис. 4в) показывает увеличение предела текучести МРЖ-3 с ростом индукции магнитного поля, а поведение жидкости в целом можно охарактеризовать как вязкопластичное при любой величине магнитного поля в исследованном диапазоне.

Высокое значение напряжения сдвига при относительно низкой магнитной индукции позволяет считать феррит марганца $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ перспективным материалом для использования в качестве наполнителя для МРЖ. Высокоэнергетический помол образца $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$, произведенный на заключительной стадии синтеза, снижает средний размер частиц порошка, увеличивает его маслосъемность и, следовательно, повышает стабильность масляных суспензий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ синтеза однофазных частиц магнетита, замещенного марганцем, с оптимальным распределением частиц по размерам, обеспечивающим высокую стабильность магнитореологических суспензий. Порошок феррита $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ (после обжига при 740°C и высокоэнергетического помола на протяжении 0.5–1.0 ч) является перспективным наполнителем для магнитореологических материалов, поскольку изготовленная с его использованием магнитореологическая жидкость обладает высоким напряжением сдвига (>3500 Па) при относительно низкой магнитной индукции (~650 мТл). Дополнительными преимуществами предложенного наполнителя являются сравнительно высокая удельная намагниченность и небольшая коэрцитивная сила.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках задания государственной программы научных исследований Республики Беларусь “Энергетические и ядерные процессы и технологии” на 2021–2025 гг. (задание 2.26 “Процессы температурной, сдвиговой и поляризационной релаксации в реологических средах при динамических воздействиях, разработка комплексных алгоритмов управления характеристиками материалов и устройств на их основе”, НИР 2.26.2 “Разработка термостабильных магниточувствительных дисперсных наполнителей для создания материалов, управляемых внешним магнитным полем”, регистрационный № 20211529.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев Е.С., Ермолаев А.И., Титов Е.Ю., Тумаков С.Ф.* Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение: монография. Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. 2017. 94 с.
2. *Vekas L.* // *Adv. Sci. Technol.* 2008. V. 54. № 1. P. 127.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.54.127>
3. *Fang F.F., Choi H.J., Jhonb M.S.* // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2009. V. 351. P. 46.
4. *Chary T.R.G., Allaparthi M., Dusa S. et al.* // *Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability. ICIMES 2023. Smart Innovation, Systems and Technologies.* Singapore: Springer, 2024. V. 372.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-6774-2_46
5. *Корсакова А.С., Котиков Д.А., Гайдук Ю.С., Паньков В.В.* // *Конденсированные среды и межфазные границы.* 2020. Т. 22. № 4. С. 466.
<https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3076>
6. *Гордеев Б.А., Иванов Е.Г., Охулков С.Н. и др.* // *Вестник машиностроения.* 2023. № 6. С. 499.
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-6-499-504>
7. *Kordonsky W.* // *Materials Technology.* 1993. V. 8. № 11/12. P. 240.
8. *Ghaffari A., Hashemabadi S., Ashtiani M.* // *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2015. V. 26. № 8. P. 881.
9. *Костров С.А., Тихонов П.А., Музафаров А.М., Крамаренко Е.Ю.* // *Высокомол. соединения. Сер. А.* 2021. Т. 63. С. 198.
<https://doi.org/10.31857/S230811202103007X>
10. *Шульман З.П., Кордонский В.И.* Магнитореологический эффект. Минск: Наука и техника, 1982. 184 с.
11. *Гордеев Б.А., Ермолаев А.И., Охулков С.Н. и др.* // *Вестник машиностроения.* 2023. № 3. С. 192.
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-3-192-201>
12. *Гареев К.Г., Лучинин В.В., Мошников В.А.* // *Биотехносфера.* 2013. Т. 5. № 29. С. 2.
13. *Lu A.-H., Salabas E.L., Schutz F.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2007. V. 46. № 8. P. 1222.
<https://doi.org/10.1002/anie.200602866>
14. *Новопашина С.А., Серебрякова М.А., Хмель С.Я.* // *Теплофизика и аэромеханика.* 2015. Т. 22. № 4. С. 411.
15. *Gupta A.K., Naregalkar R.R., Vaidya V. et al.* // *Nanomedicine.* 2007. V. 2. № 1. P. 23.
<https://doi.org/10.2217/17435889.2.1.23>
16. *Mathew D.S., Juang R.-S.* // *Chem. Eng. J.* 2007. V. 129. № 1–3. P. 51.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.11.001>
17. *Kciuk M., Turczyn R.* // *J. Achievements Mater. Manufacturing. Eng.* 2006. V. 18. № 1–2. P. 127.
18. *Kumar J.S., Paul P.S., Raghunathan G., Alex D.G.* // *Int. J. Mech. Mater. Eng.* 2019. V. 14. № 1. P. 1.
<https://doi.org/10.1186/s40712-019-0109-2>
19. *Chiriac H., Stoian G.* // *IEEE Transactions on Magnetics.* 2009. V. 45. № 10. P. 4049.
<https://doi.org/10.1109/tmag.2009.2024633>
20. *Pu H., Jiang F.* // *Nanotechnology.* 2005. V. 16. № 9. P. 1486.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/9/012>
21. *Manuel J.G. de Falco, Bombard A.J.F., Weeks E.R.* // *Smart Mater. Struct.* 2023. V. 32. № 4. P. 045014.
<https://doi.org/10.1088/1361-665X/acbb47>
22. *Вест А.* // *Химия твердого тела. Теория и приложения. В 2-х ч. / Пер. с англ. М.: Мир, 1988. Ч. 1. 558 с.*
23. *Skumryev V., Stoyanov S., Zhang Y. et al.* // *Nature.* 2003. V. 423. № 6942. P. 850.
<https://doi.org/10.1038/nature01687>
24. *Першина А.Г., Сазонов А.Э., Мильто И.В.* // *Бюллетень сибирской медицины.* 2008. Т. 7. № 2. С. 70.
<https://doi.org/10.20538/1682-0363-2008-2-70-78>

SYNTHESIS, STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF Mn-SUBSTITUTED MAGNETITE FOR MAGNETORHEOLOGICAL MATERIALS

Yu. S. Haiduk^{a,*}, E. V. Korobko^b, L. V. Radkevich^b, R. P. Golodok^a, A. E. Usenka^a, V. V. Pankov^a

^aBelarusian State University, Minsk, 220030 Belarus

^bLykov Institute of Heat and Mass Transfer, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072 Minsk

*e-mail: j_haiduk@list.ru

Iron(II)-manganese(II) ferrite with the composition $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ was synthesized using the coprecipitation method (with various options for subsequent thermal and mechanical treatment of the precipitate). The material was studied by X-ray phase analysis, infrared spectroscopy, scanning electron microscopy and magnetometry. The powder, which was fired in argon at 740°C (8.0 h) and high-energy grinding (1.0 h) at the final stage of synthesis, is a promising functional filler for magnetorheological materials. An oil suspension based on this powder shows a high shear stress value (3500 Pa at 625 mT). In addition, this powder has a high oil absorption capacity, which ensures sedimentation stability of the suspension.

Keywords: iron-manganese ferrite, magnetorheological fluids, ferrimagnets