

УДК 532.135, 537.622, 546.05

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ Mn,Zn- и Ni,Zn,Cu-ФЕРРИТОВ

**Гайдук Ю. С.¹, Шевцова К. А.², Коробко Е. В.²,
Горошко А. В.³, Моховиков М. А.¹, Усенко А. Е.¹,
Паньков В. В.¹**

¹Белорусский государственный университет, Минск,
Республика Беларусь

²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова
Национальной Академии Наук Беларуси, Минск,
Республика Беларусь

³Хмельницкий национальный университет,
Хмельницкий, Украина

Перспективным является применение микро- и наноразмерных ферритмагнитных частиц в качестве компонентов комплексной дисперсной фазы при создании магнитоологических жидкостей (МРЖ) для систем управляемых устройств гидроавтоматики. Важное значение при поиске эффективных магнитных материалов для МРЖ имеет величина напряжения сдвига суспензий, содержащих магнитные частицы при воздействии магнитного поля, а также значения коэрцитивной силы. Магнитные свойства нанопорошков, которые могут быть компонентами МРЖ, определяются их химическим составом, типом кристаллической решетки, степенью ее дефектности, размером и формой частиц, морфологией. Их проявление зависит от степени взаимодействия частиц между собой и дисперсионной средой в магнитном поле [1, 2].

Целью настоящего исследования являлось изучение структуры, морфологии, магнитных свойств нанопорошков ферритов и оценка их эффективности при использовании в управляемых жидкотекучих суспензиях.

Методика эксперимента. Порошки образцов марганец-цинкового феррита ($\text{Mn}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$) (1) получены методом низкотемпературного синтеза в условиях термовибропомола смеси Fe_2O_3 , MnCO_3 , ZnO [3]. Порошки образцов никель-цинк-медного феррита $\text{Ni}_{0,20}\text{Cu}_{0,20}\text{Zn}_{0,60}\text{Fe}_{1,96}\text{O}_4$ (2) получены высокоэнергетическим помолом смеси оксидов никеля, меди, цинка и железа, соответствующей составу.

Рентгенографические исследования проведены на дифрактометре ДРОН-3 ($\text{Co}_{K\alpha 1}$ -излучение, $\lambda = 0,179026$ нм).

ИК-спектры записывали с помощью спектрометра AVATAR 330 (ThermoNicolet) в области волновых чисел (ν) $400 - 700 \text{ см}^{-1}$ с точностью $\pm 1 \text{ см}^{-1}$.

Микроструктуру образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO 1420 и просвечивающего электронного микроскопа HitachiH 800 с ускоряющим напряжением 200 кэВ.

Петли гистерезиса при температурах 2, 10, 50, 100 и 300 К при индукции магнитного поля $B_{\text{max}} = 8$ Тл получены в результате исследования магнитных характеристик материалов на установке Cryogen Free Measurement System Cryogenic Ltd. Масса образца (1) составила 0,1006 г, масса образца (2) – 0,0541 г.

Зависимости напряжения сдвига (τ) суспензий, содержащих 20 мас.% ферромагнитных частиц, (дисперсионная среда Mobil 22) от величины индукции приложенного магнитного поля определяли на реометре PhysicaMCR 301 AntonPaar в режиме постоянной скорости сдвига $\dot{\gamma} = 200 \text{ с}^{-1}$, при температуре $T = 20^\circ\text{C}$.

Обсуждение результатов. Данные РФА-анализа (рисунок 1) и ИК-спектроскопии для образцов (1) и (2) подтверждают формирование шпинельной структуры ферритов.

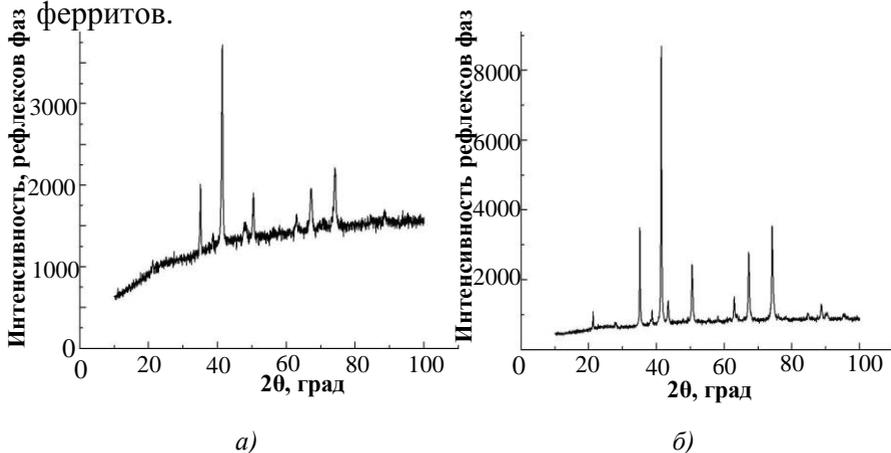


Рис. 1. Рентгенофазовый анализ: *a* - $(\text{Mn,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (1);
б - $(\text{Ni,Zn,Cu})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (2)

Для эффективного использования ферритов в составе МРЖ частицы должны обладать высокой намагниченностью насыщения и небольшой коэрцитивной силой, создающей эффект памяти. Величина намагниченности насыщения для наночастиц имеет меньшие значения, чем для микронных частиц.

На рисунке 2 представлены кривые намагниченности порошков $(\text{Mn,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $(\text{Ni,Zn,Cu})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (2) при 300 К. Видно, что абсолютное значение изменения удельной намагниченности для образца 1 больше, чем для образца 2.

Из рисунка 2 видно, что значение удельной намагниченности образца (1) составляет $M \sim 60 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$ и образца (2) $M \sim 53 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$. Для игольчатого магнетита оно

равно $M = 112 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$ [1]. Оба порошка имеют величину коэрцитивной силы $\sim 400 \text{ Oe}$.

Как правило, МРЖ с такими материалами позволяют достичь более высоких напряжений сдвига при воздействии магнитного поля.

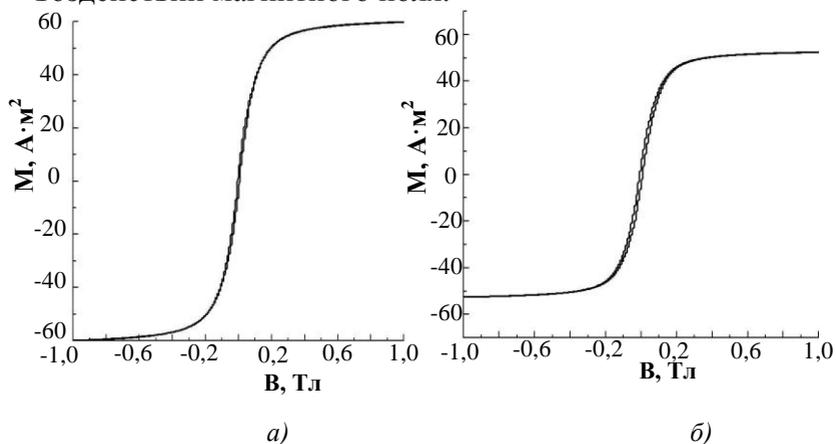


Рис. 2. Кривые намагниченности порошков ферритов: *a* - $(\text{Mn,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (1); *б*- $(\text{Ni,Zn,Cu})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (2) при 300 К

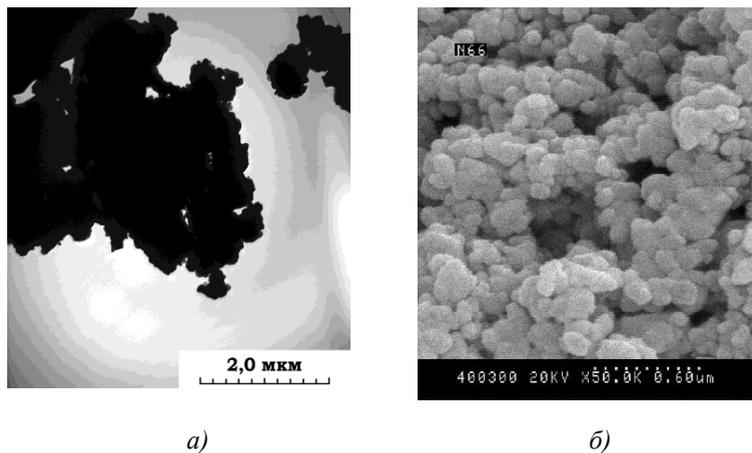


Рис. 3. Изображения порошков ферритов: *a* - $(\text{Mn,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (1) (ПЭМ); *б* - $(\text{Ni,Zn,Cu})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (2), (СЭМ).

Размер частиц исследованного порошка (1), по результатам ПЭМ-микроскопии (рисунок 3а) составляет 100 – 150 нм, и 150 – 200 нм для образца (2) (СЭМ-микроскопия, рисунок 3б). Частицы образуют агломераты размером 0,5 – 1,0 мкм и более.

Зависимости, представленные на рисунке 4, демонстрируют возрастание напряжения сдвига суспензий, содержащих ферритмагнитные частицы, от индукции магнитного поля. В наибольшей степени данный эффект выражен для суспензии, приготовленной с использованием порошка $(\text{Ni,Zn,Cu})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (2), несмотря на более низкое значение удельной намагниченности по сравнению с $(\text{Mn,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (1). Вероятно, это связано с особенностями распределения частиц в обоих порошках по форме и размеру для образцов (1) и (2). Помимо величины удельной намагниченности, форма частиц так же может вносить существенный вклад в величину напряжения сдвига суспензии.

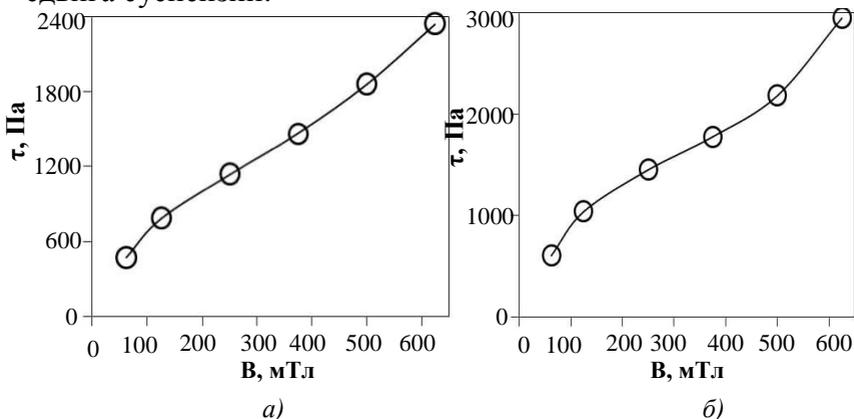


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига МРЖ, содержащих 20 мас.% магнитных наночастиц: а - $(\text{Mn,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (1); б - $(\text{Ni,Zn,Cu})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (2) в магнитном поле при скорости сдвига $\dot{\gamma} = 200 \text{ c}^{-1}$, $T = 20^\circ\text{C}$.

Порошки (1) и (2) отличаются более высокими значениями удельной намагниченности по сравнению с исследованными ранее материалами, полученными методом соосаждения водных растворов солей (например, для цинк-кобальтового феррита в работе [2]). Результат обусловлен применением и особенностями метода низкотемпературного термовибропомола, который характеризуется в целом возможностью получения материалов с высокой степенью кристалличности по сравнению с применяемыми ранее методами непосредственного получения наноразмерных ферритов, основанными на соосаждении из растворов солей металлов. Высокая степень кристалличности, а также и больший (средний размер частиц (100 – 200 нм)), по сравнению с результатами при методах соосаждения (50 – 60 нм), приводят к снижению вклада приповерхностного слоя в величину удельной намагниченности. Для приповерхностного слоя имеет место случайное распределение спин-спиновых взаимодействий, отсутствие дальнего порядка и конкуренция ферромагнитных и антиферромагнитных взаимодействий. В результате, намагниченность частиц образцов (1) и (2), имеющих размер в диапазоне 100 – 200 нм, оказывается выше, и, как следствие, наблюдаются более высокие значения напряжения сдвига в магнитореологических суспензиях.

Выводы. Высокое значение напряжения сдвига (2,5 кПа и выше) при сравнительно невысокой индукции магнитного поля (~600 мТл) позволяет считать полученные образцы наполнителя, образец (1) $(\text{Mn,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ и образец (2) $(\text{Ni,Zn,Cu})\text{Fe}_2\text{O}_4$ перспективными материалами для создания составов МРЖ с комплексной дисперсной фазой, эффективно управляемых магнитным полем.

Список использованной литературы

1. Коробко Е. В., Паньков В. В., Котиков Д. А. и др. // Наноструктуры в конденсированных средах: сборник научных статей. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 20 – 23 августа 2018 г.– С. 69–71.

2. Synthesis, structure, and magnetic properties of cobalt-zinc nanoferrite for magnetorheological liquids / Haiduk Yu. S., Korobko E. V., Shevtsova K. A. at al. // Condensed Matter and Interphases. – 2020. – Vol. 22 No 2. – P. 28–38.

3. Механизм образования марганец-цинковых ферритов в условиях термовибропомола / Летюк Л. М., Паньков В. В., Башкиров Л. А., Литвинов С. В., Ткаченко В. А. / Порошковая металлургия. – 1988. – № 11. –С.36–41.