

УДК 532.135, 537.622, 546.05

## ГЕКСАФЕРРИТ БАРИЯ КАК ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ НАПОЛНИТЕЛЬ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Гайдук Ю. С.<sup>1</sup>, Коробко Е. В.<sup>2</sup>, Радкевич Л. В.<sup>2</sup>, Котиков Д. А.<sup>1</sup>, Усенко А. Е.<sup>1</sup>, Паньков В. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет

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

**Аннотация.** Целью работы являлось изучение структуры, морфологии, магнитных свойств гексаферрита бария и оценка его эффективности в магнитном поле (по реологическим свойствам магнитоологической жидкости (МРЖ), изготовленной с его использованием). Цитратным золь-гель методом синтезирован феррит бария  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  гексагональной структуры. С использованием методов рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, ИК-спектроскопии, исследованы его структурные и микроструктурные особенности. Высокое значение напряжения сдвига суспензии (3,5 кПа) при сравнительно невысокой индукции магнитного поля (625 мТл) позволяют считать полученный материал перспективным для использования в качестве дополнительного функционального наполнителя МРЖ.

**Ключевые слова:** феррит бария, магнитоологические жидкости, магнитные жидкости.

## BARIUM HEXAFERRITE AS A FUNCTIONAL FILLER OF MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS

Haiduk Yu.<sup>1</sup>, Korobko E.<sup>2</sup>, Radkievich L.<sup>2</sup>, Kotikov D.<sup>1</sup>, Usenka A.<sup>1</sup>, Pankov V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The aim of the work was to study the structure, morphology, magnetic properties of barium hexaferrite and to evaluate its efficiency in a magnetic field (by the rheological properties of magnetorheological fluid (MRF) manufactured using it). Barium ferrite  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  of hexagonal structure was synthesized by the citrate sol-gel method. Its structural and microstructural features were studied using X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, and IR spectroscopy. The high value of the suspension shear stress (3500 Pa) at a relatively low magnetic field induction (625 mT) allow us to consider the obtained material promising for use as an additional functional filler for MRF.

**Key words:** barium ferrite, magnetorheological fluids, magnetic fluids.

Адрес для переписки: Гайдук Ю. С., ул. Ленинградская, 1-416, г. Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: j\_haiduk@list.ru

Магнитоологические жидкости (МРЖ) относятся к числу так называемых «интеллектуальных» материалов, реологические и механические свойства (вязкость, напряжение сдвига, предел текучести и т. д.) которых можно контролируемо изменять во внешнем магнитном поле. Известно, что МРЖ могут использоваться в качестве рабочих тел в магнитоуправляемых механических передаточных устройствах, например, в амортизаторах, регулирующих клапанах, различных устройствах виброзащиты и сейсмической защиты, прецизионной полировке, в космической и военной технике, биомеханике и биомедицине и т. д. [1]. В общем случае МРЖ представляют собой суспензии, состоящие из высокодисперсных и ультрадисперсных сильно намагничивающихся частиц, взвешенных в ненамагничивающейся жидкости и стабилизированных поверхностно-активными веществами.

**Методика эксперимента.** Порошок гексаферрита бария получен методом соосаждения с последующими обработкой в автоклаве и обжигом на воздухе по методике, основанной на литературных источниках [2]. Гидротермальная обработка производилась в автоклаве объемом 500 мл

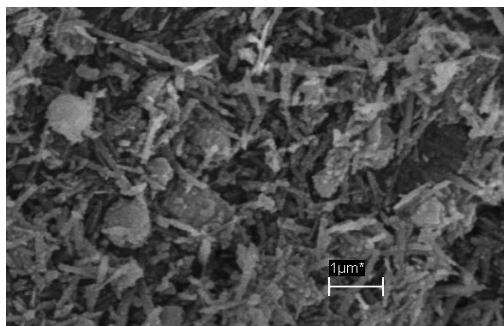
при температуре 220 °С, обжиг при температуре 1020 °С на протяжении 3 ч. На стадии обжига происходил переход в  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  примесей промежуточных фаз. В качестве исходных реагентов использовали  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  («ч»),  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  («ч»),  $\text{NaOH}$  («чда»). Раствор нитрата железа имел концентрацию 0,384 М, молярные отношения  $\text{Ba}/\text{Fe}=1:8$ ,  $[\text{OH}^-]/[\text{NO}_3^-]=2$ .

Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре ДРОН-3 ( $\text{CoK}\alpha$ -излучение,  $\lambda = 0,179026$  нм). ИК-спектр порошка получен на спектрометре AVATAR FTIR-330 (Thermo Nicolet) в области волновых чисел ( $\nu$ ) 400-700  $\text{cm}^{-1}$  с разрешением  $\pm 1$   $\text{cm}^{-1}$ . Микроструктуру образцов изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO 1420. Магнитоологическую чувствительность наполнителей определяли на вискозиметре HAAKE RV12, оснащенный индуктором магнитного поля, с измерительной ячейкой типа пластина-пластина. Для приготовления магнитоологической суспензии использовали синтетическое масло Mobil 22 в качестве жидкости-носителя, и моноолеат глицерина в качестве поверхностно-активной добавки.

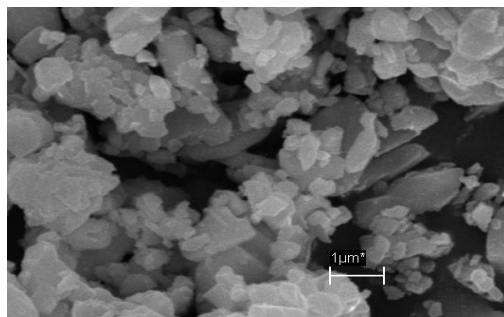
ТГ-ДТА анализ порошка проведен при помощи синхронного термического анализатора Netzsch 400 STA-449с «Jupiter» при скорости нагрева  $5^\circ/\text{мин.}$  на воздухе.

**Обсуждение результатов.** По данным РФА и ИК-спектроскопии конечным продуктом синтеза является порошок с единственной фазой гексаферрита бария, имеющей структуру магнетоплюмбита (карточка PDF-2 [39–1433]).

На рисунке 1 представлены СЭМ-микрофотографии порошка после гидротермальной обработки и после обжига на воздухе. На рисунке 1, а видны в основном пластинчатые частицы, частично агломерированные в округлые структуры диаметром  $0,5\text{--}1,5\ \mu\text{м}$ , а также нанопрутки с поперечным диаметром менее  $0,1\ \mu\text{м}$  и длиной  $2\ \mu\text{м}$  и более. Вероятно, эти образования относятся к основной и промежуточной фазе гексаферрита бария. После обжига (рисунок 1, б) видны частицы одного вида, преимущественно пластинчатой формы, диаметр которых составляет  $0,2\text{--}0,5\ \mu\text{м}$ . При этом встречаются отдельные агломераты диаметром  $1,0\text{--}2,0\ \mu\text{м}$  и более (масштабная шкала  $1\ \mu\text{м}$ ).



а



б

а – продукт синтеза в автоклаве; б – порошок после обжига

Рисунок 3 – СЭМ-изображения  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

На рисунке 2 представлены зависимости напряжения сдвига МРЖ на основе  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  от

скорости сдвига, полученные при различных значениях магнитной индукции.

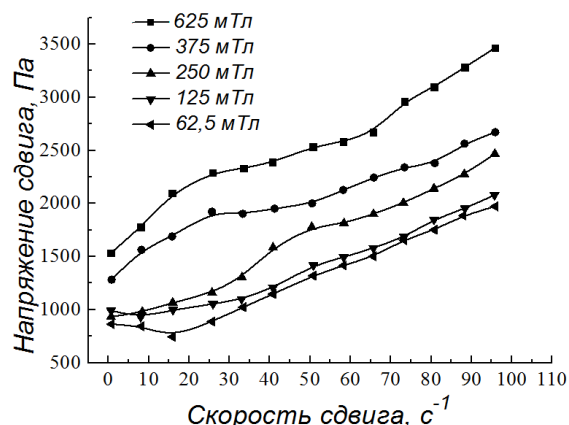


Рисунок 2 – Зависимость напряжения сдвига МРЖ, содержащей 20 мас. % наполнителя на основе  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , от индукции магнитного поля

Из рисунка 2 видно, что напряжение сдвига магнитореологической суспензии, изготовленной на основе  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  достигает  $\sim 3500\ \text{Па}$  при магнитном поле с индукцией  $625\ \text{мТл}$ . Пластинчатая форма частиц способствует обеспечению повышенного напряжения сдвига суспензии за счет формирования механически жестко сопряженных структур в магнитном поле.

Из спектров ТГ-ДТА следует, что потеря массы порошка при нагреве в интервале  $20\text{--}1200\ ^\circ\text{C}$  составляет не более  $1,7\ \%$ , при этом порошок не претерпевает ни фазовых переходов, ни других превращений с поглощением или выделением тепла, что призвано обеспечить его стабильную работу при высоких и изменяющихся температурах.

**Выводы.** Высокое значение напряжения сдвига ( $\sim 3500\ \text{Па}$ ) при сравнительно невысокой индукции магнитного поля ( $625\ \text{мТл}$ ) позволяет считать полученный с применением гидротермального метода гексаферрит бария перспективным материалом для использования в качестве функционального наполнителя МРЖ.

#### Литература

1. Нанодисперсные наполнители на основе оксида железа для комплексной дисперсной фазы магнитоуправляемых гидравлических жидкостей / Е. В. Коробко [и др.] // Наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2018 г. – С. 182–188.

2. Improving the magnetic properties of hydrothermally synthesized barium ferrite / Journal of magnetic properties of hydrothermally synthesized barium ferrite / X. Liu [at al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1999. – V. 195, iss. 2. – P. 452–459.