

УДК 621.7-4 + 621.763

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-2-13-21

## Композиционные радиопоглощающие материалы на основе порошков ферритов

© 2022 г. Г.П. Бендерский<sup>1</sup>, Ю.М. Молостова<sup>1</sup>, П.А. Румянцев<sup>2</sup>,  
С.В. Серебрянников<sup>2</sup>, С.С. Серебрянников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (МАИ (НИУ)), г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет (НИУ) «МЭИ», г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 22.02.22 г., доработана 28.03.22 г., подписана в печать 04.04.22 г.

**Аннотация:** Рассмотрено влияние размера частиц порошков гексагональных ферритов на их электродинамические характеристики. В качестве объектов исследования использованы гексаферриты  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  и  $\text{BaSc}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{O}_{19}$ . Помолом в высокоэнергетической планетарной мельнице в течение до 60 мин получены частицы порошков гексаферритов, средний размер которых последовательно уменьшался от 1,5–2,0 до 0,05–0,15 мкм. Анализ проведен с помощью растрового электронного микроскопа. В смеси с полимерным связующим (70% феррит + 30% полимер) изготовлены образцы, поглощающая способность электромагнитного излучения (ЭМИ) которых исследована в СВЧ-диапазоне от 30 до 50 ГГц. Показано, что в композите с ферритом с уменьшением среднего размера частиц порошков гексаферритов  $\text{BaSc}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{O}_{19}$  до 50–150 нм практически отсутствует пик, соответствующий ферромагнитному резонансу. Приведены зависимости действительных и мнимых частей магнитной и диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от  $10^7$  до  $10^9$  Гц. В частотной зависимости магнитных потерь композита на основе феррита, который прошел механоактивацию в течение 60 мин, резонанс доменных границ не наблюдался. Феррит состава  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  был подвергнут помолу в бисерной мельнице до частиц со средним размером 150–300 нм, затем сушке, прессованию, спеканию при температуре 1360 °С и последующему измельчению до размеров 200–500 мкм, в результате чего были получены аналогичные композиты в связке с полимером. Установлено, что с изменением технологии синтеза магнитного компонента существенно изменяются свойства композиций: резонансный характер поглощения ЭМИ не наблюдался. Измерена температура Кюри по методу Фарадея. Показано, что для исследуемого материала она составляет ~ 340 °С. Таким образом, выявлено влияние помола прекурсора на изменение магнитокристаллической анизотропии.

**Ключевые слова:** ультрадисперсные порошки, ферриты, оксидные металлы, легированные материалы, магнитные свойства, механоактивация.

**Бендерский Г.П.** – докт. техн. наук, зав. кафедрой управления инновациями, МАИ (НИУ) (121552, г. Москва, ул. Оршанская, 3). E-mail: kaf317@mail.ru.

**Молостова Ю.М.** – ст. преподаватель кафедры управления инновациями, МАИ (НИУ). E-mail: jmolostova@gmail.ru.

**Румянцев П.А.** – канд. техн. наук, науч. сотрудник кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК), НИУ «МЭИ» (111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 14). E-mail: ionve@inbox.ru.

**Серебрянников С.В.** – докт. техн. наук, профессор кафедры ФТЭМК, НИУ «МЭИ». E-mail: SerebriannikSV@mpei.ru.

**Серебрянников С.С.** – канд. техн. наук, доцент кафедры ФТЭМК, НИУ «МЭИ». E-mail: SerebriannikSS@mpei.ru.

**Для цитирования:** Бендерский Г.П., Молостова Ю.М., Румянцев П.А., Серебрянников С.В., Серебрянников С.С. Композиционные радиопоглощающие материалы на основе порошков ферритов. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2022. Т. 16. № 2. С. 13–21.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-2-13-21.

## Radar-absorbing composite materials based on ferrite powders

G.P. Benderskiy<sup>1</sup>, Yu.M. Molostova<sup>1</sup>, P.A. Rumyantsev<sup>2</sup>, S.V. Serebryannikov<sup>2</sup>, S.S. Serebryannikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI (NRU)), Moscow, Russia

<sup>2</sup> National research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI), Moscow, Russia

Received 22.02.2021, revised 28.03.2022, accepted for publication 04.04.2022

**Abstract:** The paper studies the effect of particle sizes of hexagonal ferrite powders on their electrodynamic properties.  $\text{SrTi}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{11.6}\text{O}_{19}$  and  $\text{BaSc}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{O}_{19}$  hexaferrites were used as the objects of research. Grinding in a high-energy planetary mill for up to 60 minutes made it possible to obtain hexaferrite powder particles with the average size successively decreasing from 1.5–2  $\mu\text{m}$  to 0.05–0.15  $\mu\text{m}$ . A scanning electron microscope was used for the analysis. Samples were prepared in a mixture with a polymer binder (70% ferrite + 30% polymer), and their electromagnetic radiation (EMR) absorbing capacity was studied in the microwave range from 30 to 50 GHz. It was shown that there is practically no peak corresponding to ferrimagnetic resonance in the composite with ferrite, with a decrease in the average particle size of  $\text{BaSc}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{O}_{19}$  hexaferrite powders to 50–150 nm. The dependences of the real and imaginary parts of the magnetic permeability and dielectric constant are given in the frequency range from  $10^7$  to  $10^9$  Hz. There was no domain wall resonance in the frequency dependence of magnetic losses for a ferrite-based composite mechanically activated for 60 min.  $\text{SrTi}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{11.6}\text{O}_{19}$  ferrite was milled in a bead mill to particles with an average size of 150–300 nm, and then to drying, pressing, sintering at 1360 °C and subsequent grinding to a size of 200–500  $\mu\text{m}$  to obtain similar composites in a bond with a polymer. It was found that the properties of compositions change significantly with a change in the magnetic component synthesis technology: no resonant pattern of EMR absorption was observed. The Curie temperature was measured using the Faraday method. It was shown that it is ~340 °C for the studied material. Therefore, the effect of precursor milling on changes in magnetocrystalline anisotropy was identified.

**Keywords:** ultrafine powders, ferrites, oxide metals, alloyed materials, magnetic properties, mechanical activation.

**Benderskiy G.P.** – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of innovation management, Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI (NRU)) (121552, Russia, Moscow, Orshanskaya str., 3). E-mail: kaf317@mail.ru.

**Molostova Yu.M.** – Senior lecturer, Department of innovation management, MAI (NRU). E-mail: jmolostova@gmail.ru.

**Rumyantsev P.A.** – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Department of physics and technology of electrotechnical materials and components (PTEMC), National research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI) (111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14). E-mail: ionve@inbox.ru.

**Serebryannikov S.V.** – Dr. Sci. (Eng), Professor, Department of PTMPC, National Research University «MPEI». E-mail: SerebriannikSV@mpei.ru.

**Serebryannikov S.S.** – Cand. Sci. (Eng.), Docent, Department of PTMPC, National Research University «MPEI». E-mail: SerebriannikSS@mpei.ru.

**For citation:** Benderskiy G.P., Molostova Yu.M., Rumyantsev P.A., Serebryannikov S.V., Serebryannikov S.S. Radar-absorbing composite materials based on ferrite powders. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya* (Powder Metallurgy and Functional Coatings). 2022. Vol. 16. No. 2. P. 13–21 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-2-13-21.

## Введение

Работы по созданию материалов, обеспечивающих электромагнитную совместимость и активно взаимодействующих с электромагнитным излучением (ЭМИ) в области высоких и сверхвысоких частот (ВЧ и СВЧ), проводятся многими исследователями, организациями и компаниями [1]. Современные тенденции, связанные с развитием беспроводных технологий, а также согласованной работы различных систем связи в едином пространстве, требуют создания многообразных магнитных, прежде всего СВЧ-устройств, таких как антенны, фильтры, защитные покрытия и т.д. К ним предъявляется ряд технических требова-

ний, соответствующих уровню современной электроники: малые размеры, низкие потери, согласованная работа в широком диапазоне частот [2], показатели производительности и др.

Основными компонентами в используемых материалах являются, как правило, порошки различных проводящих и полупроводящих соединений, таких как карбонильное железо, углеродные нанотрубки, разнообразные ферриты и пр. [3]. Наиболее часто применяются ферриты, обеспечивающие взаимодействие с ЭМИ [4, 5], либо поглощая, либо отражая, либо пропуская его в диапазонах частот от единиц МГц до десятков ГГц.

На их основе разрабатываются различные функциональные покрытия, выполненные с наполнением порошковыми магнитными компонентами, которые эффективно экранируют ЭМИ, создают надежную радиогерметизацию разъемных и неразъемных соединителей и швов, обеспечивают развязку узлов аппаратуры, работающей на повышенных частотах. Одновременно такие материалы применяются в устройствах, влияющих на радиозаметность габаритных объектов.

Исследование композиций на основе ферритов с гексагональной кристаллической структурой (гексаферриты) и со шпинельной структурой (феррошпинели), благодаря большим величинам поля анизотропии и намагнитченности насыщения, показали их перспективность для разработки различных устройств, работающих в СВЧ-диапазоне [6]. Устройства СВЧ позволяют управлять характеристиками волны, ее направлением, амплитудой, фазой и плоскостью поляризации.

Применение кристаллических ферритов обусловлено тем, что они обладают внутренним полем кристаллической анизотропии, которое обуславливает существование в них естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР) [7], частоту которого можно варьировать модификацией (меняя состав, структуру или технологию изготовления) [8].

Управление свойствами с помощью изменения технологии получения ферритов и шпинелей позволяет пересмотреть принципы работы таких устройств в сложных электромагнитных полях. В частности, можно смещать области ЕФМР в сторону высоких частот без применения дополнительных магнитных систем. Это ведет к снижению размеров изделий, миниатюризации излучателей [9, 10], а интеграция с полупроводниковыми системами и приборами позволяет использовать их в системах с комплементарными металлооксидными полупроводниками [11].

К таким материалам предъявляется комплекс определенных требований. Они должны обладать повышенными физико-механическими и магнитными свойствами, такими как высокая плотность, низкий уровень пористости и высокие намагнитченность насыщения и остаточная намагнитченность.

Наиболее широко порошки гексаферритов и феррошпинелей используются в качестве эффективных поглотителей электромагнитной энергии в области частот ЕФМР [12]. Рабочие частоты в поглотителях ЭМИ могут варьироваться в зависи-

мости от способа синтеза материала, химического состава и микроструктуры материала.

При разработке эффективных композиций для взаимодействия с ЭМИ остаются вопросы влияния на свойства поглощения излучения различных полимерных матриц, соединяющих порошки ферритов в композиционный материал [13, 14], а также степени измельчения ферритов, диспергированных в полимерной композиции.

Применение различных полимеров для создания матриц радиопоглощающих композиционных материалов с проводящими и непроводящими порошками рассматривалось авторами ряда работ, например [15], где показана возможность использования поливинилиденфторида, его сополимера с тетрафторэтиленом, эпоксидов, полистирола и др.

Одним из методов изменения магнитных свойств порошков гексаферритов и феррошпинелей путем уменьшения частиц до нано- и субмикронных размеров является механическая активация (МА) в высокоэнергетических мельницах [16], которая приводит к существенному возрастанию влияния дефектной поверхности и приповерхностного слоя на магнитные характеристики ультрадисперсного магнетика. При МА порошков подрешеточных оксидных ферромагнитных соединений диспергирование может вестись до полной аморфизации материала, что может повлиять на его магнитные характеристики [17]. Рассматривая взаимосвязь размеров и формы частиц порошкового материала с его магнитными свойствами на разных временных интервалах помола [18, 19], можно определить эффективные режимы процесса МА [20, 21], а следовательно, условия, при которых основным процессом является лишь измельчение частиц с сохранением кристаллической структуры [22].

В связи с вышеизложенным целью работы являлось исследование влияния размерных эффектов на магнитодинамические и поглощающие свойства ферритов  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  и  $\text{BaSc}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{O}_{19}$  при различных вариантах технологии их получения.

## Экспериментальная часть

В ходе выполнения работы был проведен помол образцов гексагональных ферритов различных составов с целью изучения влияния размера частиц порошка ( $d_{\text{cp}}$ ) на электродинамические характеристики композита. Результаты исследования на

**Средний размер частиц ферромагнитных порошков в зависимости от времени помола**

Average size of ferrimagnetic powder particles depending on milling time

| $\tau$ , мин | $d_{cp}$ , мкм |
|--------------|----------------|
| 5            | 1,5–2,0        |
| 10           | 0,5–1,0        |
| 15           | 0,4–0,6        |
| 20           | 0,2–0,5        |
| 25           | 0,2–0,4        |
| 30           | 0,15–0,3       |
| 60           | 0,05–0,15      |

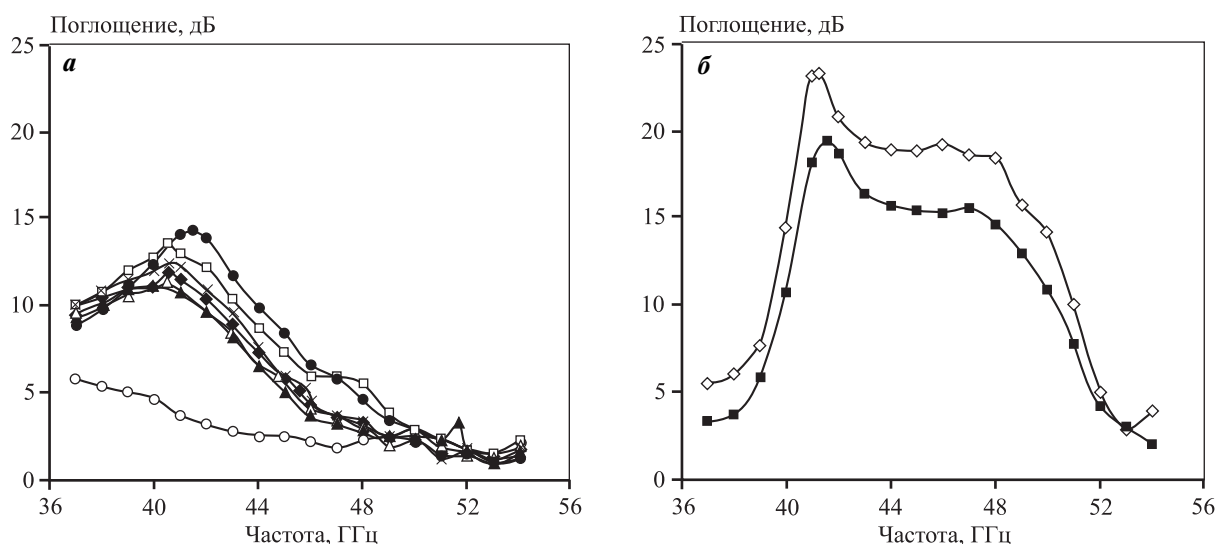
растровом электронном микроскопе SemTrac mini («Nikisso», Япония/Microtrac, США) приведены в таблице. Если построить модель, описывающую аппроксимацию зависимости среднего размера частиц порошка от времени помола ( $\tau$ ) феррита в высокоэнергетической планетарной мельнице, то она выглядит следующим образом:

$$d_{cp} = 12,31\tau^{-1,32}.$$

На следующем этапе исследований рассмотрено влияние дисперсности гексаферритового наполнителя на величину поглощения электро-

магнитного излучения (ЭМИ) композиционными радиопоглощающими материалами (рис. 1). Для этого синтезированные порошки смешивались с полимерным связующим и формовались в образцы для измерений. Соотношение компонентов композиционного материала выбрано следующим: феррит — 70 мас.%, полимерное связующее — 30 мас.%. Измерения проведены с помощью векторного анализатора цепей Agilent E4991A («Agilent Technologies», США).

Уменьшение среднего размера частиц ферромагнитного наполнителя оказывает влияние на поглощение ЭМИ при естественном ферромагнитном резонансе. Интенсивное измельчение гексаферрита приводит к изменению структуры поверхности частиц наполнителя и, как следствие, снижению объема частицы, что ведет к падению мощности поглощаемой энергии ЭМИ. Чем меньше размер синтезируемых частиц, тем существеннее вклад в свойства такого наполнителя приносит поверхность. В частотной зависимости поглощения ЭМИ композиционными материалами с наполнителями, прошедшими МА в планетарной мельнице Pulverisette7 («Fritsch», Германия), изменение структуры поверхности частиц выражается в уменьшении поглощения ЭМИ при ЕФМР и перемещении резонансной частоты в область более низких значений. В частотной за-



**Рис. 1.** Частотная зависимость поглощения ЭМИ композиционного материала на основе BaSc<sub>0.2</sub>Fe<sub>11.8</sub>O<sub>19</sub>

**а** – время помола  $\tau$ , мин: 5 (●), 10 (▲), 15 (×), 20 (◆), 25 (□), 30 (△), 60 (○)

**б** – средний размер частиц феррита  $d_{cp} = 100\div 500$  мкм (◇) и  $63\div 100$  мкм (■)

**Fig. 1.** Frequency dependence of EMR absorption by BaSc<sub>0.2</sub>Fe<sub>11.8</sub>O<sub>19</sub>-based composite material

**а** – milling time  $\tau$ , min: 5 (●), 10 (▲), 15 (×), 20 (◆), 25 (□), 30 (△), 60 (○)

**б** – average ferrite particle size  $d_{cp} = 100\div 500$  μm (◇) and  $63\div 100$  μm (■)

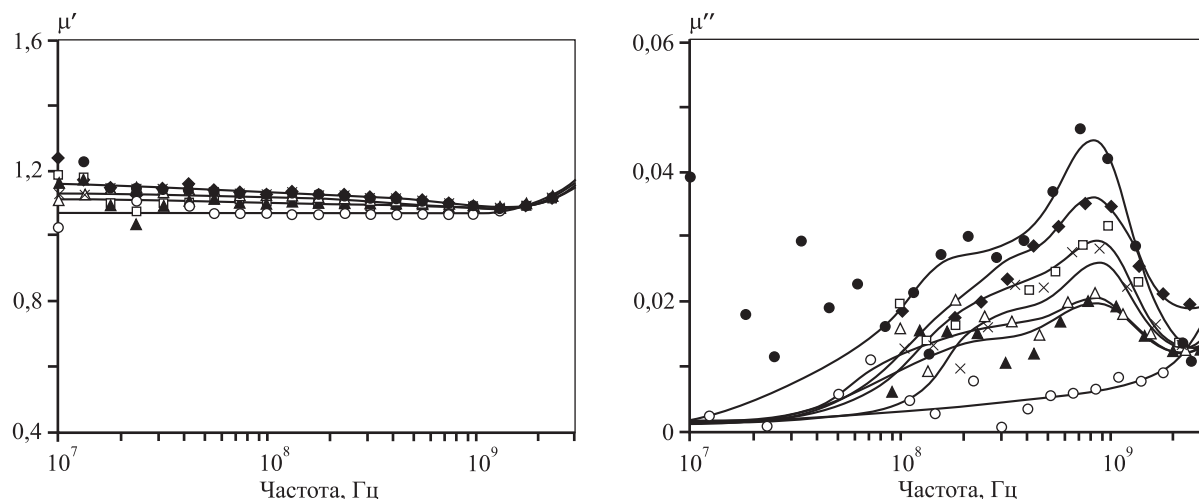
висимости поглощения ЭМИ композиционного материала с наполнителем в виде феррита, прошедшего помол в течение 60 мин ( $d_{\text{ср}} = 50 \div 150$  нм), практически отсутствует резонансный пик, соответствующий ЕФМР (см. рис. 1, а).

Измерение магнитных спектров (магнитная проницаемость  $\mu'$  — действительная часть и  $\mu''$  — мнимая (потери)) в области частот, соответствующих резонансу доменных границ ферромагнитного наполнителя, также показало уменьшение коэффициента магнитных потерь  $\mu''$  (рис. 2). У об-

разца  $\text{BaSc}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{O}_{19}$ , прошедшего механоактивацию в течение 60 мин, резонанс доменных границ не наблюдается, что может свидетельствовать о достижении монодоменности частиц полидисперсного ферритового наполнителя.

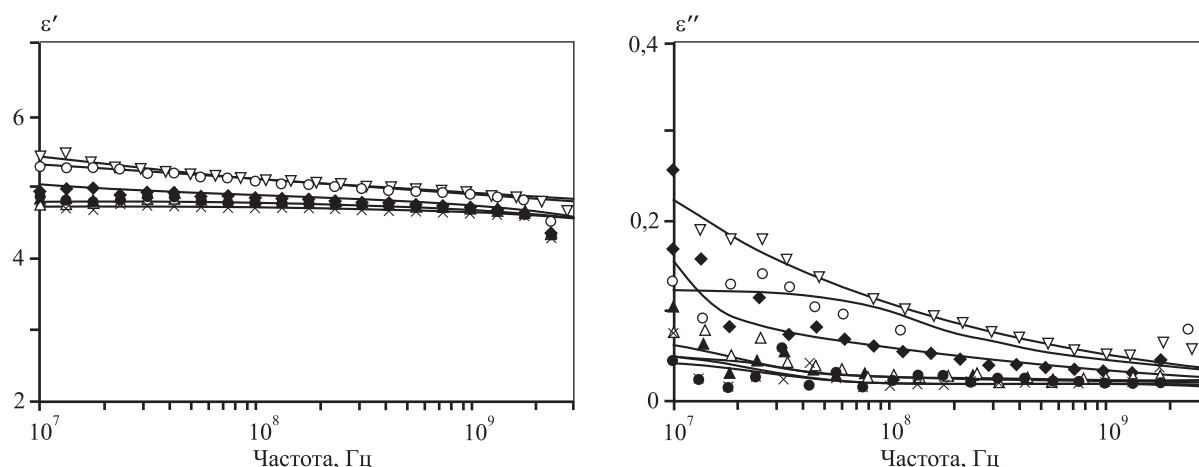
На рис. 3 представлена частотная зависимость компонентов комплексной диэлектрической проницаемости (действительная часть и мнимая (потери) —  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$ ).

Влияние среднего размера частиц гексаферритового наполнителя на частотную зависимость



**Рис. 2.** Частотная зависимость компонентов комплексной магнитной проницаемости композиционного материала на основе  $\text{BaSc}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{O}_{19}$  после помола в течение 5 мин (●), 10 (▲), 15 (×), 20 (◆), 25 (□), 30 (△), 60 (○)

**Fig. 2.** Frequency dependence of complex magnetic permeability components for  $\text{BaSc}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{O}_{19}$ -based composite material after milling for 5 min (●), 10 (▲), 15 (×), 20 (◆), 25 (□), 30 (△), 60 (○)



**Рис. 3.** Частотная зависимость компонентов комплексной диэлектрической проницаемости композиционного материала на основе  $\text{BaSc}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{O}_{19}$  после помола в течение 5 мин (●), 10 (▲), 15 (×), 20 (◆), 30 (△), 35 (▽), 60 (○)

**Fig. 3.** Frequency dependence of complex magnetic permeability components for  $\text{BaSc}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{O}_{19}$ -based composite material after milling for 5 min (●), 10 (▲), 15 (×), 20 (◆), 30 (△), 35 (▽), 60 (○)

действительной части магнитной проницаемости композиционного радиопоглощающего практически отсутствует.

Таким образом, путем интенсивной механической активации в высокоэнергетической планетарной мельнице синтезированы полидисперсные гексагональные наполнители со средним размером частиц менее 100 нм и исследовано их влияние на магнитные и диэлектрические свойства в широком диапазоне частот. С точки зрения технологичности повышение удельной поверхности частиц порошкового наполнителя при уменьшении  $d_{ср}$  приводит к увеличению плотности системы «ферритмагнитный порошок — полимерное связующее» при формовании образцов для измерения или применения.

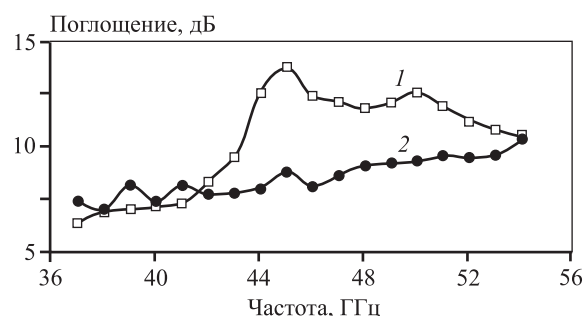
Альтернативным способом управления электродинамическими параметрами феррита с помощью механического воздействия является изменение технологического режима синтеза магнитного материала [23] путем замены стандартной стадии смешивание—помол на помол—смешивание также в высокоэнергетической мельнице. Измельчение составных компонентов синтезируемого феррита (шихты) позволяет управлять параметрами материала до процесса спекания.

Помол проводили в высокоэнергетической бисерной мельнице LabStar1 («Netcsh», Германия) до размера частиц шихты 150—300 нм. После помола порошок высушивали, прессовали и спекали при  $t = 1360^\circ\text{C}$  в течение 6 ч. Далее феррит измельчали до размеров частиц 200—500 мкм, спекали компактные образцы и измеряли их электродинамические показатели. Результаты показаны на рис. 4. Как видно, замена одной стадии в технологии привела к значительному изменению свойств материала. После помола шихты в высокоэнергетической планетарной мельнице и спекании при тех же условиях, при которых спекался материал, изготовленный без модернизации (кр. 1), на частотной зависимости поглощения (кр. 2) резонансный характер не наблюдается. На первый взгляд, это можно было бы объяснить отсутствием ферритовой фазы в композиционном материале, т.е. образец, полученный по керамической технологии с заменой стадии помола—смешивания, либо синтезировался частично, либо не синтезировался вообще, и в порошке присутствуют фазы, не обладающие резонансным поглощением.

Результаты измерения магнитного спектра данного материала при частотах резонанса домен-

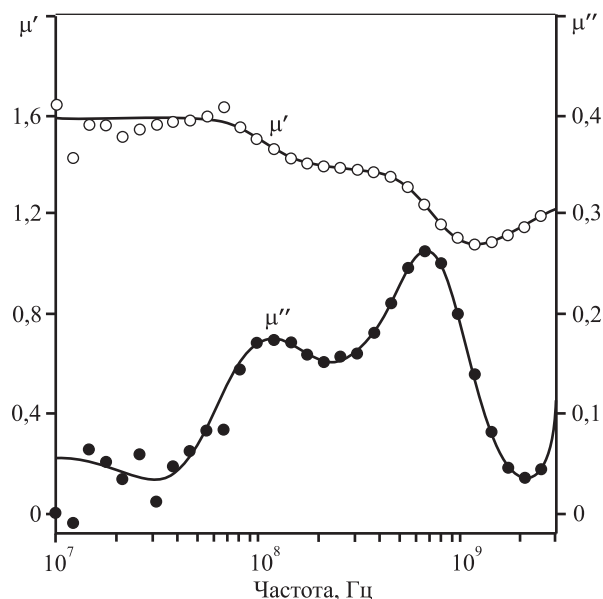
ных границ 10 МГц—3 ГГц (рис. 5) показали, что магнитный спектр данного образца схож со спектрами  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  и  $\text{BaSc}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{O}_{19}$ .

При сравнении полученных данных видно, что ферритмагнетик, прошедший помол шихты в высокоэнергетической мельнице, обладает величиной магнитных потерь, превосходящих таковые образ-



**Рис. 4.** Сравнение коэффициентов поглощения для ферритов  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$ , изготовленных по обычной технологии (1) и с высокоэнергетическим помолом шихты (2)

**Fig. 4.** Comparison of absorption coefficients for  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  ferrites produced according to a standard technology (1) and with high-energy charge milling (2)



**Рис. 5.** Магнитный спектр гексаферрита  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$ , полученного из шихты, подвергнутой помолу—смешиванию в высокоэнергетической бисерной мельнице

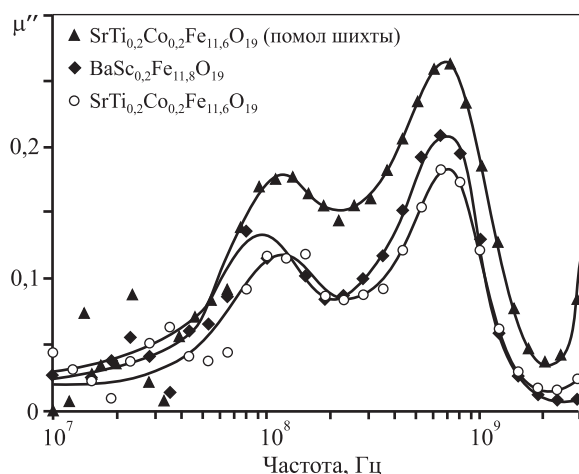
**Fig. 5.** Magnetic spectrum of  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  hexaferrite obtained from charge subjected to milling-mixing in a high-energy bead mill

цов  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  и  $\text{BaSc}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{O}_{19}$ , изготовленных по обычной керамической технологии.

Состав и кристаллическую структуру полученных материалов изучали методом рентгеновской дифрактометрии на приборе CubiX («Malvern Panalytical B.V.», Нидерланды). Сравнение рентгенограмм образцов  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$ , изготовленных по стандартной и модернизированной технологиям, показало их несовпадение. Это может свидетельствовать как о присутствии гексагональной фазы с измененными параметрами кристаллической решетки, так и о наличии другой ферритовой фазы. Для более точного и детального рассмотрения и объяснения полученных характеристик необходимо провести глубокий анализ спектров с целью определения точного состава, параметров кристаллической решетки и наличия примесных фаз.

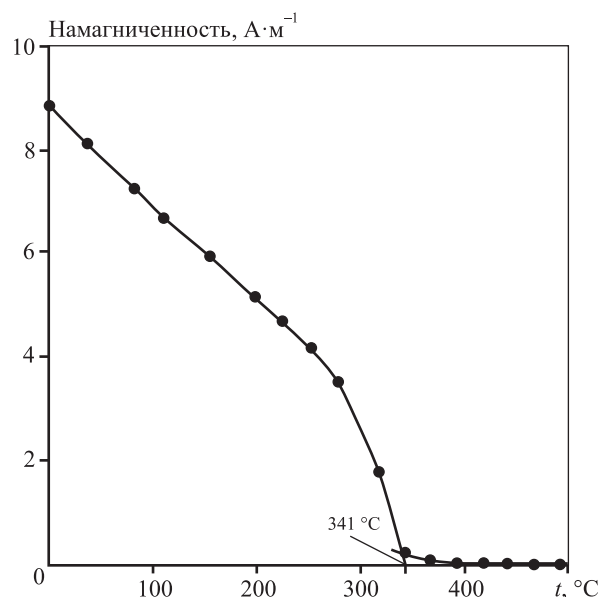
Одним из предварительных способов определения наличия гексаферритовой фазы в исследуемом материале является измерение его температуры Кюри ( $t_C$ ). Результаты ее оценки методом Фарадея приведены на рис. 7.

Полученное значение  $t_C$  составило  $341 \pm 2^\circ\text{C}$ , отсюда можно сделать следующий вывод. Поскольку температура Кюри для гексагонального феррита  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  находится в области  $450^\circ\text{C}$ , то пониженная ее величина у исследуемого материала свидетельствует либо о снижении энергии обменных взаимодействий по причине легирования феррита



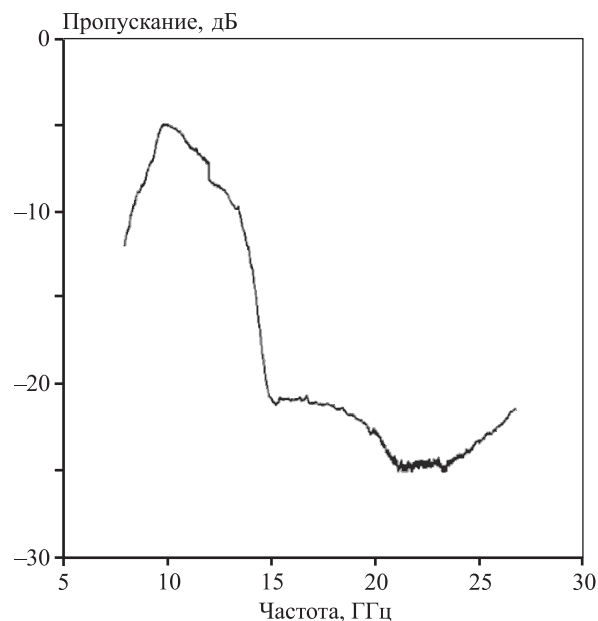
**Рис. 6.** Частотная зависимость магнитных потерь исследованных материалов на основе  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  и  $\text{BaSc}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{O}_{19}$

**Fig. 6.** Frequency dependence of magnetic losses for materials based on  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  and  $\text{BaSc}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{O}_{19}$  under study



**Рис. 7.** Температурная зависимость намагниченности феррита  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$ , изготовленного по усложненной технологии с помолем шихты

**Fig. 7.** Temperature dependence of magnetization for  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  ferrite produced according to a sophisticated technology with charge milling



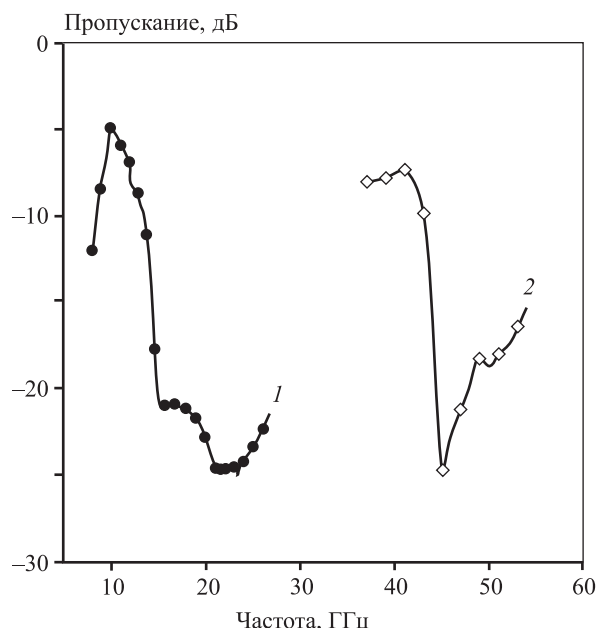
**Рис. 8.** Спектр поглощения композита на основе  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$ , синтезированного по усложненной технологии (с помолом)

**Fig. 8.** Absorption spectrum for  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$ -based composite synthesized according to a sophisticated technology (with milling)

ионами Ti и Co, либо о наличии в материале фазы, обладающей более низким значением  $t_C$ .

Сравнивая вышеприведенные данные по поглощению ЭМИ при ЕФМР (рис. 4) и результаты измерения магнитных потерь при резонансе доменных границ (рис. 6), можно предположить, что анизотропия не «исчезла», как это было в случае с гексаферритом  $\text{BaSc}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{O}_{19}$  (см. рис. 2 и 3), а изменилась по величине. Определить поле магнитокристаллической анизотропии можно по резонансным пикам ЕФМР. В связи с этим было проведено исследование поглощения ЭМИ с целью поиска ЕФМР. Результаты представлены на рис. 8. Хорошо видно, что использование ультрадисперсного порошка прекурсора привело к уменьшению значения энергии магнитокристаллической анизотропии и, как следствие, к снижению частоты ЕФМР феррита.

На рис. 9 приведены частотные зависимости поглощения ЭМИ для образцов гексаферрита, изготовленных по обычной технологии и из ультрадисперсного порошка прекурсора. Можно сделать



**Рис. 9.** Спектры поглощения образцов феррита  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$ , изготовленных по разным технологиям

1 – усложненный метод, с помоллом (толщина образца  $h = 5$  мм),  
2 – стандартный ( $h = 2,65$  мм)

**Fig. 9.** Absorption spectra for  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  ferrite samples produced according to different technologies

1 – sophisticated method, with milling (sample thickness is  $h = 5$  мм),  
2 – standard ( $h = 2.65$  мм)

вывод, что помол шихты приводит к изменению энергии магнитокристаллической анизотропии.

## Заключение

Исследованы закономерности проявления роли размерных эффектов при формировании свойств композитных материалов. Показано, что изменение среднего размера частиц ферритмагнитного наполнителя оказывает влияние на мощность поглощаемого ЭМИ при явлении ЕФМР, а также на коэффициент потерь при резонансе доменных границ в композиционных радиопоглощающих материалах. Уменьшение среднего размера частиц ферритмагнитного наполнителя до менее чем 100 нм приводит к уменьшению поглощения ЭМИ при явлении ЕФМР до 5 дБ и существенному снижению коэффициента магнитных потерь.

Исследована возможность управления свойствами гексагональных ферритов путем изменения размера частиц прекурсора, что может послужить альтернативой методу легирования этих материалов.

Установлено, что уменьшение размера частиц прекурсора от  $\approx 20$  мкм до 50–300 нм приводит к изменению частоты ЕФМР гексаферрита  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  с 45 до  $\approx 23$  ГГц. При этом магнитные потери в образцах, изготовленных из ультрадисперсных прекурсоров, возросли по сравнению с образцом, полученным по стандартной технологии. Это позволяет говорить о перспективности данного метода в разработке современных материалов для радиоэлектроники за счет получения ультрадисперсных порошковых материалов и их применения в композиционных системах.

## Литература/References

1. Белоус А.И., Марданов М.К., Шведов С.В. СВЧ-электроника в системах радиолокации связи. Технологическая энциклопедия. Кн. 1. М.: Техносфера, 2021.  
*Belous A.I., Mardanov M.K., Shvedov S.V. Microwave-electronics in radar connection systems. Technological encyclopedia. Book 1. Moscow: Tekhnosfera, 2021 (In Russ.).*
2. El Gharbi M.M., Fernández-García R., Ahyoud S., Gil I. A review of flexible wearable antenna sensors: Design, fabrication methods, and applications. *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 17. P. 3781–3799.
3. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов. *Вестник Воронежского гос. техн. ун-та*. 2012. Т. 8. No. 6. С. 70–76.

- Latypova A.F., Kalinin Y.E. Analise of promising radio-absorbing materials. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2012. Vol. 8. No. 6. P. 70—76 (In Russ.).
4. Acharya R., Kumar D., Mathur G. Study of electromagnetic radiation effects on human body and reduction techniques. In: *Opt. Wirel. Technol.* Singapore, Springer, 2018. P. 497—505.
  5. Harris V.G. Modern microwave ferrites. *IEEE Trans. Magn.* 2011. Vol. 48. No. 3. P. 1075—1104.
  6. Ibrahim N. A., Abd Rahman T., Elijah O. Recent trend in electromagnetic radiation and compliance assessments for 5G communication. *Int. J. Electr. Comp. Eng.* 2017. Vol. 7. No. 2. P. 912—918.
  7. Von Sovskii S.V. (ed.). Ferromagnetic resonance: The phenomenon of resonant absorption of a high-frequency magnetic field in ferromagnetic substances. Elsevier, 2016.
  8. Карпов В.Н., Кутайцев А.А., Михайловский Л.К., Савченко Н.И., Чепарин В.П. Применение естественного ферромагнитного резонанса в диспергированных гексаферритах для решения задач электромагнитной совместимости. В сб.: *Тр. междунар. конф. по гиromaгнитной бестоковой электронике*. М.: МЭИ, 1995. С. 426—431.  
Karpov V.N., Kitaitsev A.A., Mikhailovskiy L.K., Savtchenko N.I., Tcheparin V.P. Application of natural ferromagnetic resonance in dispersed hexaferrites to solve problems of electromagnetic compatibility. In: *Trudy mezhdunarodnoi konferentsii po giromaгnitnoi bestokovoi ehlektronike*. Moscow: MPEI, 1995. P. 426—431 (In Russ.).
  9. Yang C., Liu F., Ren T.L., Liu L.T., Chen G., Guan X.K., Yue Z.X. Ferrite-partially-filled on-chip RF inductor fabricated using low-temperature nano-powder-mixed-photolithography filling technique for standard CMOS. In: *International Electron Devices Meeting. IEEE*. 2007. P. 1038—1040.
  10. Bae S., Hong Y.K., Lee J.J., Seong W.M., Kum J.S., Ahn W.K., Park J.H. Miniaturized broadband ferrite T-DMB antenna for mobile-phone applications. *IEEE Trans. Magn.* 2010. Vol. 46. No. 6. P. 2361—2364.
  11. Khanna V.K. Emerging trends in ultra-miniaturized CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) transistors, single-electron, and molecular-scale devices: A comparative analysis for high-performance computational nanoelectronics. *J. Sci. Industr. Res.* 2004. Vol. 63. No. 10. P. 795—806.
  12. Петрович Н.Е., Журавлев В.А., Политов М.В. Магнитные свойства наноразмерных порошков гексаферритов. *Вестник Томского гос. ун-та*. 2003. No. 278. С. 70—72.  
Petrovitch N.E., Zhuravlev V.A., Politov M.V. Magnetic properties of nanoscale hexaferrite powders. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2003. No. 278. P. 70—72 (In Russ.).
  13. Drmota A., Koselj J., Drofenik M., Žnidaršič A. Electromagnetic wave absorption of polymeric nanocomposites based on ferrite with a spinel and hexagonal crystal structure. *J. Magnetism and Magnetic Mater.* 2012. Vol. 324. No. 6. P. 1225—1229.
  14. Houbi A., Aldashevich Z.A., Atassi Y., Telmanovna Z.B., Saule M., Kubanych K. Microwave absorbing properties of ferrites and their composites. A review. *J. Magnetism and Magnetic Mater.* 2021. Vol. 529. P. 167839.
  15. Морченко А.Т. К моделированию структуры и условий поглощения электромагнитного излучения в феррит-диэлектрических композитах с использованием представлений эффективной среды. *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2014. Т. 78. No. 11. С. 1482—1490.  
Morchenko A.T. To model the structure and conditions of electromagnetic radiation absorption in ferrite-dielectric composites using representations of the effective medium. *Izv. RAS. Seriya Fizicheskaya*. 2014. Vol. 78. No. 11. P. 1482—1490 (In Russ.).
  16. Ультрадисперсные наноразмерные порошки: Создание, строение, производство и применение. Под ред. акад. В.М. Бузника. Томск: Изд-во НТЛ, 2009.  
Buznik V.M. (ed.). Ultrafine nanoscale powders: Creation, structure, production and application. Tomsk: NTL, 2009 (In Russ.).
  17. McHenry M.E., Willard M.A., Laughlin D.E. Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets. *Progr. Mater. Sci.* 1999. Vol. 44. No. 4. P. 291—433.
  18. Ristanović Z., Kalezić—Glišović A., Mitrović N., Đukić S., Kosanović D., Maričić A. The influence of mechanochemical activation and thermal treatment on magnetic properties of the BaTiO<sub>3</sub>—Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> powder mixture. *Sci. Sintering*. 2015. Vol. 47. No. 1. P. 3—14. DOI:10.2298/SOS141121001R.
  19. Petrovskij E., Alcalá M.D., Criado J.M., Grygar T., Kapičková A., Šubrt J. Magnetic properties of magnetite prepared by ball-milling of hematite with iron. *J. Magnetism and Magnetic Mater.* 2010. No. 1-3. P. 257—273.
  20. Айзикович Б.В., Алексеев А.Г., Клиодт М.Ф., Старостин А.П. Теоретические основы создания радиопоглощающих покрытий на основе наноструктурированных материалов. *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2006. No. 30 (314). С. 136—145.  
Aizikovitch B.V., Alekseev A.G., Kliodt M.F., Starostin A.P. Theoretical foundations of the creation of radio-absorbing coatings based on nanostructured materials. *Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova*. 2006. No. 30 (314). P. 136—145 (In Russ.).
  21. Naiden E.P., Zhuravlyov R.A., Itin V.I., Terekhova O.G., Politov M.V., Lopushniak Y.M., Tcherbakov V.E. Magnetic properties of hexaferrite nanosized powders produced via mechanoactivation. *Sci. Sintering*. 2005. Vol. 37. No. 2. P. 107—114.
  22. Petrovskij E., Alcalá M.D., Criado J.M., Gryga, T., Kapičková A., Šubrt J. Magnetic properties of magnetite prepared by ball-milling of hematite with iron. *J. Magnetism and Magnetic Mater.* 2000. Vol. 210. No. 1-3. P. 257—273.
  23. 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. *Appl. Phys. A*. 2016. Vol. 122. No. 7. P. 1—15.