

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. MAGNETIC MATERIALS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2014. Т. 17, № 3. С. 183–188.
ISSN 1609–3577. DOI: 10.17073/1609–3577–2014–3–183–188

УДК 621.318.1:548.53

ПОЛУЧЕНИЕ ГЕКСАФЕРРИТА БАРИЯ С ПОВЫШЕННЫМИ ИЗОТРОПНЫМИ СВОЙСТВАМИ

© 2014 г. **И. И. Канева¹**, **В. Г. Костишин¹**, **В. Г. Андреев²**,
Д. Н. Читанов¹, **А. Н. Николаев²**, **Е. И. Кислякова¹**

¹Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия

²Кузнецкий институт информационных и управленческих технологий
(филиал) Пензенского государственного университета,
ул. Маяковского, 57А, Кузнецк, 442530, Россия

В настоящее время в мировом производстве постоянных магнитов, составляющем ~150 тыс. т/год, на долю керамических магнитов из гексагональных ферритов бария и стронция приходится более 90 %. Наилучшие магнитные свойства имеют анизотропные гексаферриты, в которых создана текстура прессованием в магнитном поле, т. е. гексагональные оси чешуйчатых частиц порошка ориентированы в направлении магнитного поля, тогда магнитные свойства в этом направлении возрастают, а в других снижаются. Однако для большого числа применений могут успешно использоваться более дешевые изотропные магниты, с меньшими значениями магнитных свойств, в них магнитные оси частиц распределены равномерно по всем направлениям и, следовательно, значения магнитных свойств по всем направлениям одинаковы. Однако, известные технологии получения изотропных магнитов не обеспечивают достаточную изотропность свойств, так как при прессовании образуется текстура вследствие ориентации чешуйчатых частиц гексаферрита, что снижает магнитную энергию кольцевых магнитов в радиальном направлении. Исследована возможность получения гексаферрита бария с изотропными свойствами при использовании короткой технологической схемы, исключающей операции диффузионного обжига и измельчения. Показано, что такая технологическая схема, включающая прессование гранулированной со связкой смеси исходных компонентов с формой частиц, близкой к сферической, позволяет получить повышенную изотропность магнита.

Ключевые слова: гексаферрит бария, гексаферрит стронция, микроструктура, измельчение, изотропные и анизотропные магнитные свойства.

Введение

Гексаферриты имеют гексагональную кристаллическую структуру типа магнетоплюмбита [1], одну ось легкого намагничивания и высокое значение константы магнитной анизотропии:

– для гексаферрита бария $K_1 = 3,0 \cdot 10^6$ эрг/см³ [2];

– для гексаферрита стронция $K_1 = 3,3 \cdot 10^6$ эрг/см³ [1, 2].

Благодаря этому из гексаферритов могут быть изготовлены постоянные магниты с высокой коэрцитивной силой.

К достоинствам ферритовых магнитов можно отнести также возможность осуществлять у них многополюсное намагничивание на цельном компактном изделии, а также низкую электропроводность, позволяющую применять ферритовые магниты при нали-

чии высокочастотных магнитных полей. Комбинация коррозионно-стойких порошков ферритовых магнитов с полимерными связующими позволяет производить эластичные и пластичные изделия методами экструзии или проката в форме лент или тонкослойных пленок [2]. Недостатком ферритовых магнитов является существенная зависимость коэрцитивной силы от температуры, которая ограничивает использование этих материалов при отрицательных (ниже –20 °С) температурах. Свойства порошковых постоянных магнитов зависят от технологических методов их изготовления, причем варьировать режимы можно на любой технологической операции [3–7].

Наиболее высокие значения магнитных свойств наблюдаются в анизотропных гексаферритах,

Канева Ирина Ивановна¹ — кандидат техн. наук, доцент; **Костишин Владимир Григорьевич¹** — доктор физ.-мат. наук, доцент; **Андреев Валерий Георгиевич²** — доктор техн. наук, профессор, e-mail: ilem58@mail.ru; **Читанов Денис Николаевич¹** — кандидат физ.-мат. наук, заведующий лабораторией; **Николаев Алексей Николаевич²** — технолог; **Кислякова Екатерина Игоревна¹** — студент; e-mail: kei88@inbox.ru.

прессование которых проводится в магнитном поле. Однако и изотропные гексаферриты бария находят в настоящее время достаточно широкое применение [1]. Из-за чешуйчатой формы частиц гексаферрита бария даже при прессовании без магнитного поля в образцах возникает текстура, что приводит к снижению свойств изотропных гексаферритов.

При получении изотропных гексаферритов по стандартной керамической технологии [8–10] в процессе диффузионного обжига имеет место формирование чешуйчатых частиц гексаферрита из смеси исходных компонентов. При дальнейшем прессовании гранулированных частиц гексаферрита чешуйчатой формы, несмотря на отсутствие магнитного поля, в пресс-заготовках возникает нежелательная текстура. При спекании сырых заготовок текстура значительно повышается, что приводит к снижению магнитных свойств спеченных ферритов в направлении, перпендикулярном к оси прессования [2].

Цель работы — нахождение технологических способов получения гексаферрита бария с повышенными изотропными свойствами.

Образцы и методы исследования

Образцы феррита марки 7БИ215 изготавливали на предприятии ООО «Мета-Феррит» (г. Кузнецк) по стандартной (СТС) и короткой (КТС) технологическим схемам (рис. 1). Состав гексаферрита бария — 19 % (масс.) BaCO_3 и 81 % (масс.) Fe_2O_3 — соответствовал гексаферриту бария с недостатком Fe_2O_3 , т. е. $\text{BaO} \cdot 5,8\text{Fe}_2\text{O}_3$ [11]. В случае КТС в исходную смесь вводили борную кислоту H_3BO_3 в количестве 0,7 % (масс.). Сухое смешение исходных компонентов проводили в вибрационной мельнице М-200 в течение 2 ч.

Гранулирование проводили механическим перемешиванием порошка со связкой с последующей протиркой через сетку с размером ячеек 0,5 мм.

В качестве связки использовали следующие растворы:

- при СТС 10 %-ный водный раствор поливинилового спирта ПВС в количестве 10 % по массе;
- при КТС 2 %-ный водный раствор метилцеллюлозы в количестве 10 % по массе. Использование метилцеллюлозы обусловлено химическим взаимодействием поливинилового спирта с борной кислотой, вводимой в шихту при КТС.

Использование КТС позволяет гранулировать порошки методом высокопроизводительной распылительной сушки. Порошки бариевых ферритов (при использовании СТС) не позволяют получать устойчивые водные суспензии из-за непрерывного растворения бария в воде [2]. В случае смеси оксида железа и карбоната бария (КТС) процессы растворения незначительны.

Удельное давление прессования $P_{\text{уд}} = 200$ МПа. Спекание проводили в туннельной печи «Ель-2» в воздушной среде при $T = 1080 \pm 120$ °С.

Анализ изломов образцов выполняли методом электронной микрофрактографии [11] на сканирующем микроскопе Hitachi S-800.

Плотность спеченных изделий определяли методом гидростатического взвешивания на весах АДВ-200М с относительной погрешностью ± 5 %.

Магнитные параметры измеряли на установке ЭМ8-10.

Количественную оценку степени текстуры D_T (в %) образцов проводили по значениям остаточной магнитной индукции B_r (в Тл), измеренным в замкнутой магнитной цепи вдоль (\parallel) и поперек (\perp) оси текстуры [12], и вычисляли по формуле

$$D_T = \left[1 - \frac{B_{r\perp}}{B_{r\parallel}} \right] \cdot 100. \quad (1)$$

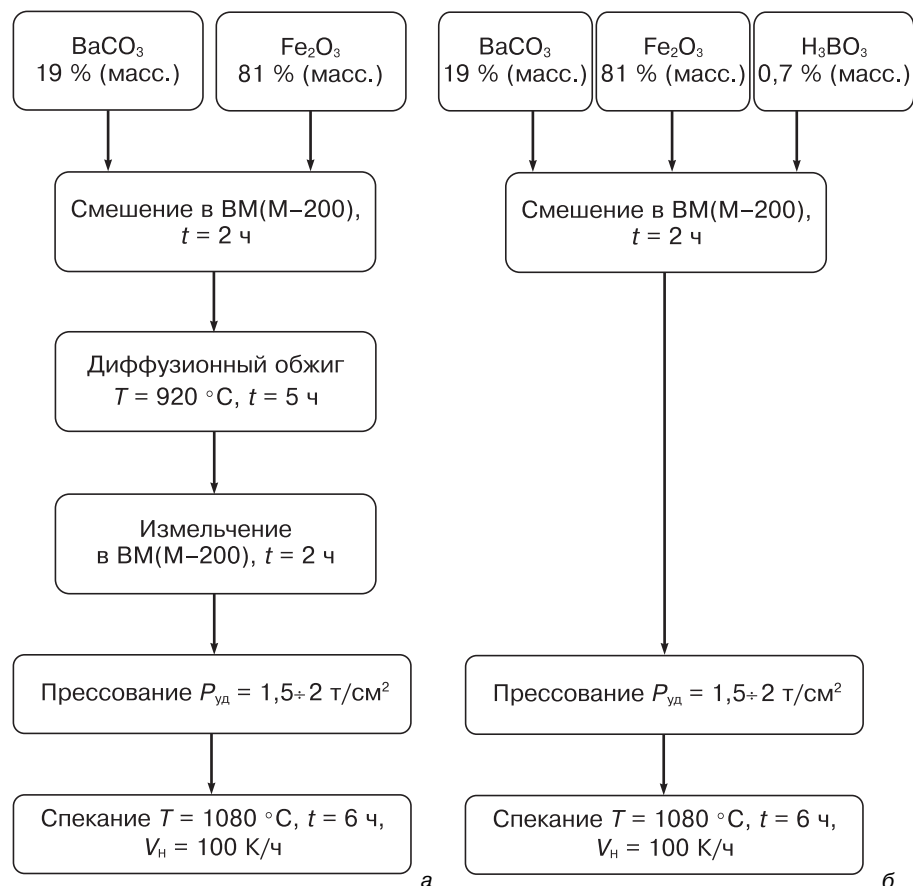


Рис. 1. Технологические схемы получения феррита марки 7БИ215: а — СТС; б — КТС

Таблица 1

Свойства гексаферрита бария марки 7БИ215

Номер партии	Добавки	Технологическая схема	или \perp оси пресс.	$T_{\text{спек.}}$, °C	d_c , г/см ³	B_r , Тл	I_{H_c} , кА/м	B_{H_c} , кА/м	BH_{max} , кДж/м ³	D_T , %
1	—	СТС	 \perp	1080	—	0,21 0,17	240 237	209 184	7,05 5,01	20
2	—	КТС	 \perp	1120	4,5	0,18 0,18	190 187	174 175	6,05 6,05	0
3	H ₃ BO ₃ , 0,7 % (масс.)	КТС	 \perp	1120	4,9	0,21 0,21	220 220	205 205	7,05 7,05	0
	ТУ	—	\perp	—	—	0,21	215	—	7	—

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что при использовании СТС возникает анизотропия свойств магнитов в направлениях, параллельных и перпендикулярных оси прессования, что объясняется чешуйчатой формой

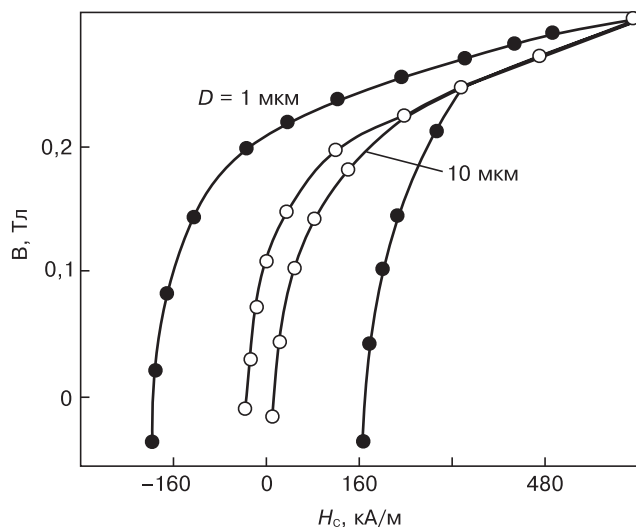


Рис. 2. Влияние размера зерен феррита бария на его коэрцитивную силу

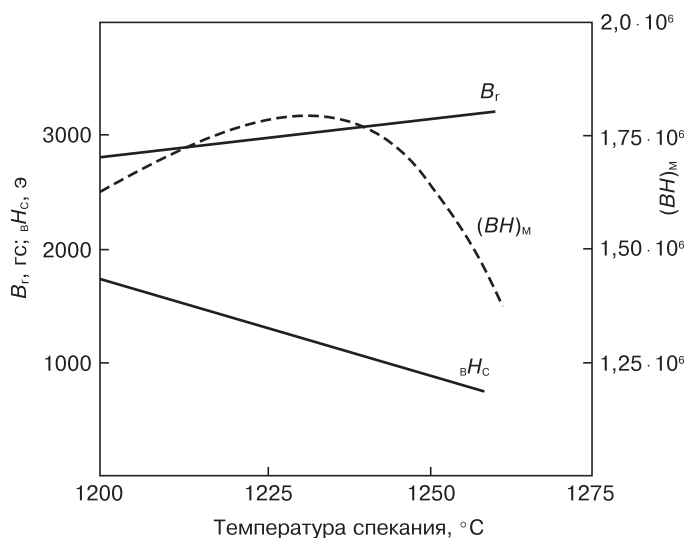


Рис. 3. Влияние температуры спекания на магнитные свойства BaFe₁₂O₁₉

частиц гексаферрита, образованного при диффузионном обжиге [2]. В этом случае в процессе прессования, несмотря на отсутствие магнитного поля, частицы гексаферрита ориентируются плоскостью чешуйки поперек оси прессования, в результате образуется текстура, которая усиливается при спекании, что не позволяет изготавливать кольцевые магниты с большим числом полюсов в радиальном направлении.

Предполагалось, что при использовании КТС текстура при прессовании не возникнет, поскольку прессованию будет подвергаться шихта, состоящая из исходных компонентов, частицы которых имеют, как правило, форму, близкую к сферической.

В табл. 1 представлены свойства исследованных образцов.

Образцы, полученные по СТС (партия 1), имеют магнитные свойства, удовлетворяющие требованиям ТУ для марки 7БИ215. Однако свойства анизотропны, степень текстуры составляет 20 % [12].

При изготовлении многополюсных кольцевых магнитов с радиальным намагничиванием, перпендикулярным к оси кольца, совпадающей с осью прессования, это приводит к снижению параметров на 30 %.

Простая замена СТС на КТС не позволяет получить достаточно высокую плотность образцов при спекании в заданных температурных интервалах. Можно предположить, что при совмещении операций ферритизации и спекания процессы спекания не начинаются, пока не завершится реакция ферритизации. Это приводит к снижению магнитных параметров гексаферрита.

Для повышения плотности необходимо повысить $T_{\text{спек.}}$. Из данных табл. 1 следует, что образцы, полученные по КТС, даже при более высокой $T_{\text{спек.}}$ (1120 °C, партия 2), имеют заниженные свойства. Однако текстура в образцах, как и предполагали, отсутствует.

Дальнейшее повышение температуры спекания считали не целесообразным, так как известно, что при повышении T увеличивается средний размер зерна, а это влечет за собой резкое снижение коэрцитивной силы (рис. 2, рис. 3) [2, 4, 13].

Для активации спекания с целью повышения плотности и магнитных параметров феррита была приготовлена партия образцов (партия 3) с добавкой 0,7 % (масс.) флюсовой добавки H_3BO_3 [14] сверх

стехиометрии. При $T = 200$ °С борная кислота разлагается по реакции



Таблица 2

Влияние добавок на свойства гексаферрита бария [1]

Микродобавки	B_r , Тл	H_c , кА/м	$(BH)_{\max}$, кДж/м ³	d_c , г/см ³
—	0,19	124	5,9	4,1
SiO_2 , H_3BO_3 , CaCO_3	0,22	135	7,3	4,4
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, CaCO_3 , MnCO_3	0,20	125	6,1	4,4

При $T = 600$ °С происходит плавление V_2O_5 с образованием жидкой фазы. В присутствии жидкой фазы процессы уплотнения проходят при значительно более низкой температуре [15, 16], что позволяет получать плотные ферриты с однородной микроструктурой без увеличения температуры спекания (рис. 4), [17–20], табл. 2 [1].

Использование такого технологического приема позволило получить гексаферрит бария с плотностью $d_c = 4,9$ г/см³ и требуемыми магнитными свойствами (см. табл. 1). При этом достигнута главная поставленная цель: свойства являются изотропными.

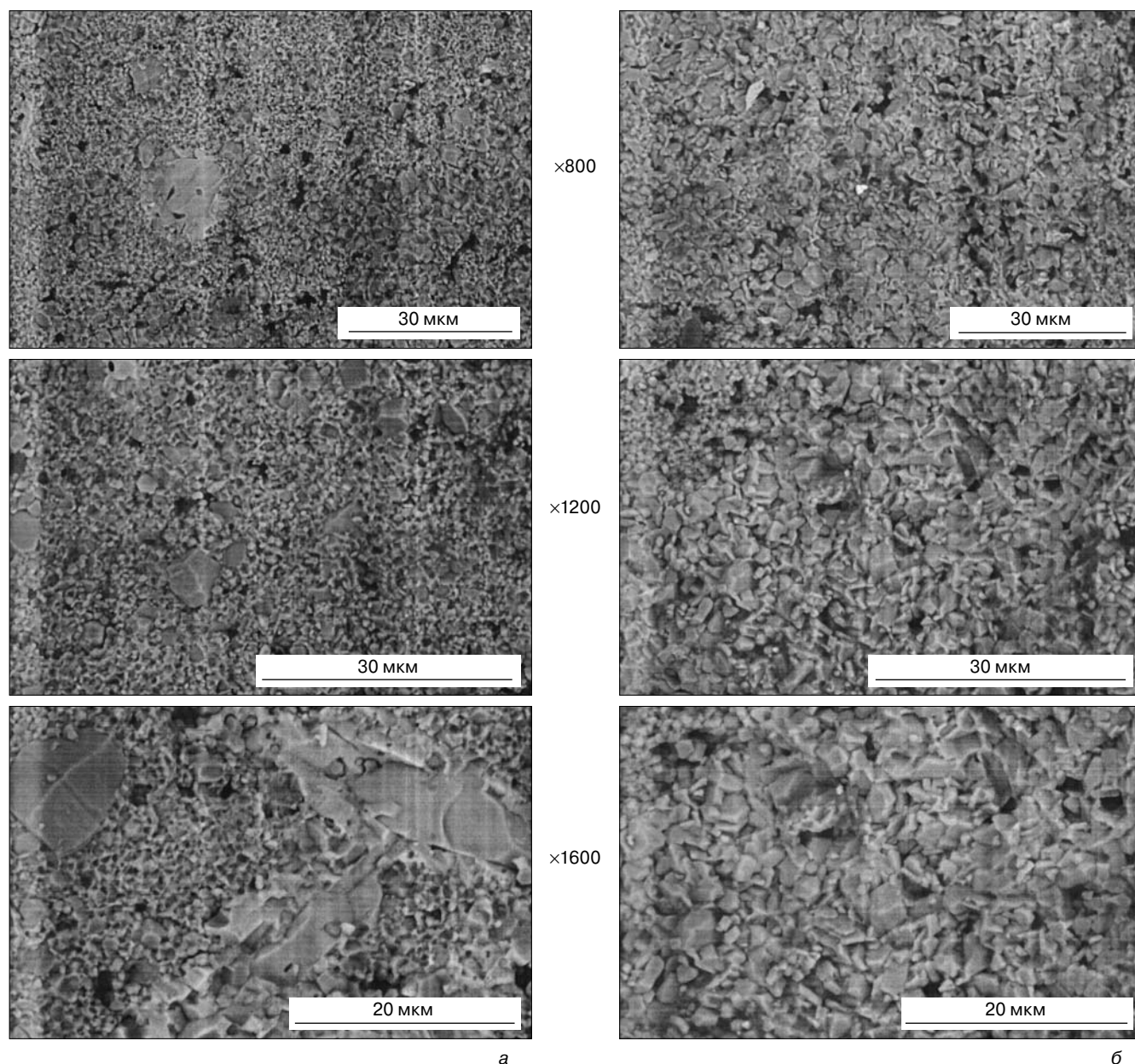


Рис. 4. Фрактограммы гексаферрита марки 7БИ215:
а — СТС; б — КТС

Таблица 3

Свойства феррита марки 7БИ215

Свойства	СТС	КТС
$B_{r\parallel}/B_{r\perp}$	1,09	1
$H_{c\parallel}/H_{c\perp}$	1,11	1
$(BH)_{\max\parallel}/(BH)_{\max\perp}$	1,2	1
$D_T, \%$	20	0

В табл. 3 представлены сравнительные результаты измерения свойств образцов гексаферрита, полученных по СТС и КТС (партии 1 и 3 соответственно). Переход от СТС к КТС позволил получить феррит марки 7БИ215 с магнитными свойствами, удовлетворяющими требованиям ТУ и являющимися изотропными.

Заключение

Показано, что при использовании стандартной технологической схемы СТС свойства феррита марки 7БИ215 являются анизотропными, что обусловлено чешуйчатой формой частиц гексаферрита, образующегося при диффузионном обжиге. В направлении, перпендикулярном к оси прессования, свойства на 30 % ниже, чем вдоль оси прессования. Это не позволяет изготавливать кольцевые магниты с большим числом полюсов в радиальном направлении.

Проведено исследование возможности получения феррита марки 7БИ215 с изотропными свойствами при использовании короткой технологической схемы КТС, когда прессованию подвергаются не чешуйчатые частицы гексаферрита, а шарообразные частицы исходных компонентов.

Показано, что при $T_{\text{сп}} = 1080$ °С, обычно используемой при получении гексаферрита бария, по КТС получены образцы с низкой плотностью и изотропными, но низкими магнитными параметрами. Повышение температуры спекания до 1120 °С привело к увеличению магнитных свойств феррита, однако они оказались на 15 % ниже требуемого уровня.

Использование добавки борной кислоты H_3BO_3 (при $T_{\text{сп}} = 1120$ °С и КТС) позволило повысить плотность феррита в результате жидкофазного спекания и получить требуемые значения B_r , H_c и $(BH)_{\max}$, при этом магнитные свойства являются изотропными.

Выход годных при использовании КТС, как и в случае СТС, составил 80 %. Использование КТС позволяет, в отличие от СТС, гранулировать порошки методом высокопроизводительной распылительной сушки.

Библиографический список

1. Анциферов, В. Н. Проблемы порошкового материаловедения. Ч. IV. Материаловедение поликристаллических ферритов / В. Н. Анциферов, Л. М. Летюк, В. Г. Андреев, А. Н. Дубров, А. В. Гончар, В. Г. Костишин, А. И. Сатин. – Екатеринбург: Уро РАН, 2004. – 395 с.

2. Анциферов, В. Н. Проблемы порошкового материаловедения. Ч. V. Технология производства порошковых ферритовых материалов / В. Н. Анциферов, Л. М. Летюк, В. Г. Андреев, А. В. Гончар, А. Н. Дубров, В. Г. Костишин, А. И. Сатин. – Екатеринбург: Уро РАН, 2005. – 408 с.

3. Rathenau, G. W. Ferromagnetic properties of hexagonal iron-oxide compounds with and without a preferred orientation / G. W. Rathenau, J. Smit, A. L. Stuyts // Zeitschrift of Physik. – 1952. – V. 133. – P. 250–260.

4. Гершов, И. Ю. Постоянные магниты из феррита бария / И. Ю. Гершов // Порошковая металлургия. – 1962. – № 5. – С. 99–108.

5. Канева, И. И. Исследование возможности получения марганец-цинкового феррита по короткой технологической схеме / И. И. Канева, В. Г. Костишин, В. Г. Андреев, А. Н. Николаев, Е. И. Волкова // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2013. – № 1. – С. 23–27.

6. Went, J. J. Ferroxidure a glass of new permanent magnet materials / J. J. Went, G. W. Rathenau, E. W. Gorter, G. W. Oosterhout // Phillips Technical Rev. – 1952. – V. 13, N 7. – P. 194–208.

7. Непомнящий, В. В. Влияние различных технологических методов изготовления порошковых постоянных магнитов на их свойства / В. В. Непомнящий, Т. В. Мосина, А. К. Радченко, В. А. Назаренко // Порошковая металлургия. – 2009. – № 1/2. – С. 143–147.

8. Fahlenbrach, H. Oxydische dauermagnete aus bariumoxyd und eisenoxid / H. Fahlenbrach, W. Heister // Archiv fur das Eisenhüttenwesen. – 1953. – V. 24. – P. 523–528.

9. Gershov, I. Yu. Properties and uses of barium ferrite ceramic magnets / I. Yu. Gershov // Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1963. – V. 2, N 3. – P. 227–234.

10. Шольц, Н. Н. Оксидные магнитные материалы. Вып. 5 / Н. Н. Шольц, К. А. Пискарев. – Сб. : ГКРЭ, 1958. – 24 с.

11. Шура, Е. А. Фрактография и атлас фрактограмм / Е. А. Шура. – М. : Металлургия, 1982. – 490 с.

12. Гершов, И. Ю. Изменение степени преимущественной кристаллографической ориентации и магнитных свойств текстурованных постоянных магнитов из феррита бария в процессе спекания / И. Ю. Гершов // Порошковая металлургия. – 1971. – № 5. – С. 87–93.

13. Левин, Б. Е. Физико-химические основы получения, свойства и применения ферритов / Б. Е. Левин, Ю. Д. Третьяков, Л. М. Летюк. – М. : Металлургия, 1979. – 471 с.

14. Федоров, А. Н. Закономерность фазовых и структурных превращений в анизотропных ферритах бария и пути их использования в технологии оксидных магнитов. Кандидатская диссертация. – М. : МИСиС, 1990. – 147 с.

15. Летюк, Л. М. Закономерности формирования микроструктуры ферритов, спекаемых в присутствии жидкой фазы / Л. М. Летюк, К. Д. Дугар-Жабон, Г. И. Каморина, В. А. Нифонтов, О. А. Блистанова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1979. – № 11. – С. 124–128.

16. Смит, Я. Ферриты: Физические свойства и практические применения / Я. Смит, Х. Вейн. – М. : НИЛ, 1962. – 498 с.

17. Горелик, С. С. Формирование микроструктуры и свойств ферритов в процессе рекристаллизации / С. С. Горелик, Э. А. Бабич, Л. М. Летюк. – М. : Металлургия, 1984. – 109 с.

18. Канева, И. И. Исследование влияния длительности измельчения порошков гексаферрита стронция на микроструктуру и свойства магнитов на их основе / И. И. Канева, В. Г. Андреев, С. В. Подгорная, А. Н. Тихонов // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2010. – № 2. – С. 43–47.

19. Канева, И. И. Ферритовые материалы и компоненты магнитоэлектроники: Лабораторный практикум / И. И. Канева, Д. Г. Крутогин, Л. М. Летюк. – М. : МИСиС, 2005. – 155 с.

20. Канева, И. И. Технология микро- и нанозлектроники: Лабораторный практикум / И. И. Канева, С. В. Подгорная, В. Г. Андреев. – М. : МИСиС, 2011. – 160 с.

Работа выполнена в НИТУ «МИСиС» при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.575.21.0030 от 27 июня 2014 г. (RFMEFI57514X0030).

Статья поступила в редакцию
03 декабря 2014 г.

Obtaining Barium Hexaferrite Brand 7BI215 with Isotropic Properties

Irina Ivanovna Kaneva¹ — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor; **Vladimir Grigorievich Kostishin**¹ — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Head of Chair «Technology of Materials of Electronics»; **Valerii Georgievich Andreev**² — Dr. Sci. (Eng.), Professor (ilem58@mail.ru); **Denis Nikolaevich Chitanov**¹ — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Head of Laboratory; **Aleksei Nikolaevich Nikolaev**² — Technologist; **Ekaterina Igorevna Kislyakova**¹ — Student (kei88@inbox.ru).

¹*National University of Science and Technology «MISIS»,
4 Leninskiy prospekt, Moscow 119049, Russia*

²*Kuznetsk Institute of Informatics and Management
Technologies (branch of Penza State University),
57a Mayakovskiy Str., Kuznetsk 442600, Russia*

Abstract. Currently, the world production of permanent magnets is about 150 tonnes. Year, the share of ceramic magnets of hexagonal barium ferrite represents more than 90 %.

Barium hexaferrite have a hexagonal magnetoplumbite type crystal structure with a large crystal magnetic anisotropy constant, which allows fine-grained structure of the material having a high coercive force.

The combination of barium and strontium hexaferrites high coercivity with high residual induction produces magnets satisfactory for a large number of applications of specific magnetic energy, and the availability and low cost of raw materials, low cost production of ferrite magnets can produce tens of thousands of tons per year and meet about 75 % of the world market of permanent magnets.

Upon receipt of a standard isotropic hexaferrite ceramic technology during pressing because scaly particles hexaferrite presszagotokah occurs in texture, resulting in poor magnetic properties of the sintered ferrite.

In the present work we investigated the possibility of barium hexaferrite brand 7BI215 with isotropic properties by using a short circuit process where compaction is not exposed hexaferrite particles and the particles of the charge, having a shape close to spherical.

Keywords: geksaferrit barium, strontium geksaferrit, microstructure, grinding, isotropic and anisotropic magnetic properties.

References

1. Antsiferov V. N., Letyuk L. M., Andreev V. G., Dubrov A. N., Gonchar A. V., Kostishyn V. G., Satin A. I. *Problemy poroshkovogo materialovedeniya*. Chast' IV. Materialovedenie polikristallicheskih ferritov [Problems of powder materials. Part IV. Materials Science polycrystalline ferrites]. Ekaterinburg: Uro RAN, 2004. 395 p. (In Russ.)
2. Antsiferov V. N., Letyuk L. M., Andreev V. G., Gonchar A. V., Dubrov A. N., Kostishyn V. G., Satin A. I. *Problemy poroshkovogo materialovedeniya*. Chast' V. Tekhnologiya proizvodstva poroshkovykh ferritovykh materialov [Problems of powder materials. Part V. The technology of production of powdered ferrite materials]. Ekaterinburg: Uro RAN, 2005. 408 p. (In Russ.)
3. Rathenau G. W., Smit J., Stuyts A. L. Ferromagnetic properties of hexagonal iron-oxide compounds with and without a preferred orientation. *Zeitschrift Of Physik*. 1952, vol. 133, pp. 250–260.
4. Gershov I. Yu. Permanent magnets of barium ferrite. *Poroshkovaya metallurgiya = Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1962, no. 5, pp. 99–108. (In Russ.)
5. Kaneva I. I., Kostishyn V. G., Andreev V. G., Nikolaev A. N., Volkova E. I. Study the possibility of obtaining a manganese-zinc ferrite on the short flowsheet. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2013, no. 1, pp. 23–27. (In Russ.)

6. Went J. J., Rathenau G. W., Gorter E. W., Oosterhout G. W. Ferroxidure a glass of new permanent magnet materials. *Phillips Technical Review*. 1952, vol. 13, no. 7, pp. 194–208.

7. Nepomnyashchii V. V., Mosina T. V., Radchenko A. K., Nazarenko V. A. Influence of different technological methods of manufacturing powder permanent magnets on their properties. *Poroshkovaya metallurgiya = Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2009, no. 1/2, pp. 143–147. (In Russ.)

8. Fahlenbrach H., Heister W. Oxydische douermagnete aus bariumoxyd und eisenoxid. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1953, vol. 24, pp. 523–528.

9. Gershov I. Yu. Properties and uses of barium ferrite ceramic magnets. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1963, vol. 2, no. 3, pp. 227–234.

10. Shol'ts, N. N., Piskarev K. A. *Oksidnye magnitnye materialy*. Vypusk 5 [Oxide magnetic materials. Issue 5]. Sb.: GKRE, 1958. 24 p. (In Russ.)

11. Shura E. A. *Fraktografiya i atlas fraktogramm* [Fractography and satin fraktogramm]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 490 p. (In Russ.)

12. Gershov I. Yu. Changing the degree of crystallographic preferred orientation and magnetic properties of the permanent magnets textured barium ferrite during sintering. *Poroshkovaya metallurgiya = Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1971, no. 5, p. 87–93. (In Russ.)

13. Levin B. E., Tret'yakov Yu. D., Letyuk L. M. *Fiziko-khimicheskie osnovy polucheniya, svoystva i primeneniya ferritov* [Physico-chemical principles, properties and applications of ferrites]. Moscow: Metallurgiya, 1979. 471 p. (In Russ.)

14. Fedorov A. N. *Zakonomernost' fazovykh i strukturnykh prevrashchenii v anizotropnykh ferritakh bariya i puti ikh ispol'zovaniya v tekhnologii oksidnykh magnetov* [The pattern of phase and structural transformations in anisotropic barium ferrite and ways to use the technology of oxide magnets]. Kandidatskaya dissertatsiya [PhD thesis]. Moscow: MISiS, 1985. 147 p. (In Russ.)

15. Letyuk L. M., Dugar-Zhabon K. D., Kamorina G. I., Nifontov V. A., Blistanova O. A. Regularities of the formation of the microstructure of ferrite, sintered in the presence of a liquid phase. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Ferrous metallurgy*. 1979, no. 11, pp. 124–128. (In Russ.)

16. Smit Ya., Vein Kh. Ferrity: *Fizicheskie svoystva i prakticheskie primeneniya* [Ferrites: Physical properties and practical applications]. Moscow: NIL, 1962. 498 p. (In Russ.)

17. Gorelik S. S., Babich E. A., Letyuk L. M. *Formirovanie mikrostruktury i svoystv ferritov v protsesse rekristallizatsii* [Formation of the microstructure and properties of iron in the process of recrystallization]. Moscow: Metallurgiya, 1984. 109 p. (In Russ.)

18. Kaneva I. I., Andreev V. G., Podgornaya S. V., Tikhonov A. N. Investigation of the effect duration of grinding powder of strontium hexaferrite microstructure and properties of the magnets on the basis of their. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2010, no. 2, pp. 43–47. (In Russ.)

19. Kaneva I. I., Krutogin D. G., Letyuk L. M. *Ferritovye materialy i komponenty magnitoelektroniki* [Ferrite materials and components magnitoelektroniki]. Laboratornyi praktikum. Moscow: MISiS, 2005. 155 p. (In Russ.)

20. Kaneva I. I., Podgornaya S. V., Andreev V. G. *Tekhnologiya mikro- i nanoelektroniki* [Technology micro- and nanoelectronics]. Laboratornyi praktikum. Moscow: MISiS, 2011. 160 p. (In Russ.)

Acknowledgements. This work in MISiS with the financial support of Ministry of Education of the Russian Federation in the framework of an agreement for a grant No 14.575.21.0030 from June 27, 2014 (RFMEFI57514X0030).

Received December 3, 2014