

УДК 541.124 + 546.431

ЦЗЭ У<sup>1</sup>, Л. А. БАШКИРОВ<sup>1</sup>, С. В. СЛОНСКАЯ<sup>2</sup>,  
С. В. ШЕВЧЕНКО<sup>1</sup>, В. Н. ШАМБАЛЁВ<sup>3</sup>**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ  
НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА СТРОНЦИЯ М-ТИПА С ЗАМЕЩЕНИЕМ  
ИОНОВ Sr<sup>2+</sup> ИОНАМИ Sm<sup>3+</sup>, Gd<sup>3+</sup> И ИОНОВ Fe<sup>3+</sup> ИОНАМИ Zn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет,<sup>2</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет,<sup>3</sup>Опытно-производственное республиканское унитарное предприятие «Феррит»

(Поступила в редакцию 24.03.2015)

**Введение.** Феррит стронция SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> со структурой магнетоплюмбита является одноосным ферритмагнетиком, имеет большую величину коэрцитивной силы ( $H_c$ ) и широко используется для изготовления постоянных керамических магнитов [1–3]. До середины 90-х годов XX века улучшение магнитных свойств постоянных магнитов из феррита SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> в основном достигалось за счет модификации технологии их изготовления. В настоящее время перспективным направлением поиска новых магнитотвердых материалов для изготовления керамических постоянных магнитов с улучшенными магнитными характеристиками является изучение твердых растворов на основе феррита SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, в котором часть ионов Sr<sup>2+</sup> замещена ионами редкоземельного элемента Ln<sup>3+</sup> (Ln – La<sup>3+</sup>, Pr<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>) и для сохранения условия электронейтральности эквивалентное количество ионов Fe<sup>3+</sup> замещено ионами M<sup>2+</sup> (M – Zn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>). Так, в работе [4] установлено, что в системе Sr<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>19</sub> повышение степени замещения  $x$  до 0,3 приводит к постепенному увеличению намагниченности и уменьшению коэрцитивной силы, а анизотропный постоянный магнит, изготовленный из твердого раствора Sr<sub>0,7</sub>La<sub>0,3</sub>Fe<sub>11,7</sub>Zn<sub>0,3</sub>O<sub>19</sub>, имеет величину энергетического произведения  $(BH)_{\max} = 41$  кДж/м<sup>3</sup>. В работе [5] показано, что в системе Sr<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub> частичное замещение ионов стронция Sr<sup>2+</sup> ионами La<sup>3+</sup> и ионов Fe<sup>3+</sup> ионами Co<sup>2+</sup> до  $x = 0,2$  приводит к уменьшению намагниченности, но одновременно с этим происходит увеличение поля анизотропии, что позволяет из твердого раствора Sr<sub>0,8</sub>La<sub>0,2</sub>Fe<sub>11,8</sub>Co<sub>0,2</sub>O<sub>19</sub> изготавливать анизотропные постоянные магниты с величиной  $(BH)_{\max} = 38,4$  кДж/м<sup>3</sup>. В последние годы опубликован ряд работ, в которых исследованы кристаллическая структура, магнитные и электрические свойства ферритов систем Sr<sub>1-x</sub>Ln<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>M<sub>x</sub>O<sub>19</sub> (Ln – La, Pr, Nd, Sm; M – Zn, Co, Mn, Cu, Fe) [6–15]. В работе [6] изучены кристаллическая структура, спектры Мессбауэра ферритов системы Sr<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>Fe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, в которых проведено частичное замещение ионов Sr<sup>2+</sup> феррита SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> ионами Sm<sup>3+</sup> ( $x = 0; 0,125; 0,25$ ) и для сохранения условия электронейтральности эквивалентное количество ионов Fe<sup>3+</sup> переходит в ионы Fe<sup>2+</sup>. В работе [7] изучены кристаллическая структура, магнитные свойства ферритов систем Sr<sub>1-x</sub>Ln<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Fe<sub>x</sub>O<sub>19</sub> (Ln – La, Pr, Nd, Sm) и показано, что из исследованных ферритов наибольшей величиной коэрцитивной силы  $H_c \approx 348$  кА/м (4372 Э) обладает твердый раствор Sr<sub>0,8</sub>Sm<sub>0,2</sub>Fe<sub>11,8</sub>Fe<sub>0,2</sub>O<sub>19</sub>.

Цель настоящей работы – изготовление изотропных постоянных магнитов из порошков высококоэрцитивных ферритов Sr<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>19</sub>, Sr<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub>, Sr<sub>1-x</sub>Gd<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>19</sub>, Sr<sub>1-x</sub>Gd<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub>, (Ba<sub>0,5</sub>Sr<sub>0,5</sub>)<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ ), в которых проведено частичное гетеровалентное замещение ионов Sr<sup>2+</sup> в феррите SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> ионами Sm<sup>3+</sup>, Gd<sup>3+</sup> и эквивалентное количество ионов Fe<sup>3+</sup> ионами Zn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, и изучение магнитной индукции ( $B_r$ ), коэрцитивной силы ( $BH_c$ ), энергетического произведения  $(BH)_{\max}$  этих изотропных постоянных магнитов.

**Методика эксперимента.** Твердофазным методом были получены порошки ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$ ,  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$  ( $\text{M}^{2+} - \text{Zn}^{2+}, \text{Co}^{2+}$ ),  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ ) и феррита-алюмината  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ . Смеси порошков соответствующих оксидов самария ( $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ), гадолиния ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ), железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), цинка ( $\text{ZnO}$ ), кобальта ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ), алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и карбонатов стронция ( $\text{SrCO}_3$ ), бария ( $\text{BaCO}_3$ ), взятых в определенных стехиометрических соотношениях, подвергали помолу в планетарной мельнице «Pulverizette 6» фирмы Fritsch с добавлением этанола в течение 20 мин. Полученную шихту прессовали под давлением 50–75 МПа в таблетки диаметром 25 мм и высотой 5–7 мм, которые затем обжигали на подложках из оксида алюминия при температуре 1473 К на воздухе в течение 8 ч. После первого обжига таблетки дробили, перемалывали, прессовали в таблетки диаметром 25 мм и высотой 5–7 мм, которые повторно обжигали на воздухе при температуре 1473 К в течение 4 ч. После охлаждения таблетки дробили, перемалывали и полученные порошки исследованных ферритов и феррита-алюмината  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$  использовали для изготовления образцов изотропных постоянных магнитов. На основе полученных порошков ферритов были приготовлены две партии шихты для изготовления изотропных постоянных магнитов. Одна партия была приготовлена из порошков ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$ ,  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$  ( $\text{M}^{2+} - \text{Zn}^{2+}, \text{Co}^{2+}$ ),  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ ) и содержала только широко используемую комплексную добавку (1 %  $\text{CaCO}_3$ , 0,25 %  $\text{SiO}_2$ , 0,3 %  $\text{H}_3\text{BO}_3$  от массы данных ферритов). Другая партия, кроме этой комплексной добавки, содержала также 0,75 мас. % высококоэрцитивного  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ . Полученные смеси порошков ферритов и соответствующих добавок подвергали помолу в планетарной мельнице с добавлением этанола в течение 20 мин. После помола в шихту из пипетки добавляли 3–4 капли 10 %-ного водного раствора поливинилового спирта и в агатовой ступке тщательно перемешивали. Образцы прессовали в форме цилиндра ( $d = 15$  мм,  $h = 12$ –13 мм), которые обжигали на воздухе при 1433 К в течение 2 ч. Магнитные характеристики ( $B_r$ ,  $BH_c$ ,  $(BH)_{\max}$ ) полученных изотропных постоянных магнитов определяли индукционно-импульсным методом на установке УИ–200–М в импульсном магнитном поле 1,5 Тл.

**Результаты и их обсуждение.** Анализ величин магнитных свойств полученных изотропных постоянных магнитов, приведенных в таблице, показывает, что кроме магнита, изготовленного из феррита  $\text{Sr}_{0,8}\text{Gd}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_{19}$ , для исследованных изотропных магнитов, содержащих добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ , значения коэрцитивной силы ( $BH_c$ ) и энергетического произведения  $(BH)_{\max}$  были больше, чем для магнитов из этих ферритов, но без добавки  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ . Например, величины коэрцитивной силы ( $BH_c$ ) и энергетического произведения  $(BH)_{\max}$  изотропного постоянного магнита из  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , содержавшего добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ , на 37,5 и 16,0 % соответственно больше, чем величины этих параметров для магнита, изготовленного также из  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , но без добавки  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ . Величины коэрцитивной силы ( $BH_c$ ) и энергетического произведения  $(BH)_{\max}$  изотропного постоянного магнита из феррита  $\text{Sr}_{0,8}\text{Sm}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Zn}_{0,2}\text{O}_{19}$ , содержащего дополнительную добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ , были на 34,5 и 19,9 % соответственно больше величин этих магнитных параметров у магнита, изготовленного из этого феррита  $\text{Sr}_{0,8}\text{Sm}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Zn}_{0,2}\text{O}_{19}$ , но без дополнительной добавки  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ .

Значения кажущейся плотности ( $\rho_{\text{каж}}$ ) образцов изотропных магнитов, изготовленных из исследованных ферритов и содержащих добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ , были незначительно больше значений кажущейся плотности ( $\rho_{\text{каж}}$ ) образцов магнитов, изготовленных из этих ферритов, но не содержащих добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ . Это указывает на более интенсивное протекание процессов спекания при обжиге образцов, содержавших добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ , так как кристаллическая структура этой добавки изоморфна структуре ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$ ,  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$  ( $\text{M}^{2+} - \text{Zn}^{2+}, \text{Co}^{2+}$ ),  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ .

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что лишь в системах  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  повышение степени замещения  $x$  до 0,1 приводит к увеличению остаточной магнитной индукция ( $B_r$ ), коэрцитивной силы ( $BH_c$ ) и энергетического произведения  $(BH)_{\max}$  изотропных постоянных магнитов, изготовленных из этих ферритов, как содержащих добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ , так без этой добавки, и при дальнейшем увеличении параметра состава  $x$  до 0,3 эти магнитные параметры уменьшаются (рис. 1). В других исследованных системах

**Кажущаяся плотность ( $\rho_{\text{каж}}$ ), остаточная магнитная индукция ( $B_r$ ), коэрцитивная сила ( $BH_c$ ),  
и энергетическое произведение  $(BH)_{\text{макс}}$  изотропных постоянных магнитов  
из ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Ln}_x\text{Fe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$  ( $\text{Ln}^{3+} - \text{Sm}^{3+}, \text{Gd}^{3+}; \text{M}^{2+} - \text{Co}^{2+}, \text{Zn}^{2+}$ ) и  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$**

Состав	Без добавки $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$				С добавкой $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$			
	$\rho_{\text{каж}}, \text{г/см}^3$	$B_r, \text{Т}$	$BH_c, \text{кА/м}$	$(BH)_{\text{макс}}, \text{кДж/м}^3$	$\rho_{\text{каж}}, \text{г/см}^3$	$B_r, \text{Т}$	$BH_c, \text{кА/м}$	$(BH)_{\text{макс}}, \text{кДж/м}^3$
<b><math>\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}</math></b>								
$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$	4,17	0,188	80	4,49	4,26	0,191	110	5,21
$\text{Sr}_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Zn}_{0,1}\text{O}_{19}$	4,06	0,187	46	2,71	4,12	0,193	48	2,89
$\text{Sr}_{0,8}\text{Sm}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Zn}_{0,2}\text{O}_{19}$	4,15	0,190	84	4,67	4,34	0,199	113	5,60
$\text{Sr}_{0,7}\text{Sm}_{0,3}\text{Fe}_{11,7}\text{Zn}_{0,3}\text{O}_{19}$	4,20	0,165	61	2,88	4,31	0,168	64	3,04
<b><math>\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}</math></b>								
$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$	4,17	0,188	80	4,49	4,26	0,191	110	5,21
$\text{Sr}_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$	4,19	0,207	108	5,74	4,20	0,210	115	5,93
$\text{Sr}_{0,8}\text{Sm}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_{19}$	4,11	0,181	74	4,28	4,15	0,180	79	4,36
$\text{Sr}_{0,7}\text{Sm}_{0,3}\text{Fe}_{11,7}\text{Co}_{0,3}\text{O}_{19}$	4,21	0,175	65	3,68	4,28	0,170	75	3,82
<b><math>(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}</math></b>								
$(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$	4,13	0,183	95	4,39	4,17	0,188	111	5,20
$(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$	4,09	0,196	115	5,42	4,12	0,192	145	6,14
$(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{0,8}\text{Sm}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_{19}$	4,01	0,165	72	3,12	4,07	0,169	78	3,65
$(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{0,7}\text{Sm}_{0,3}\text{Fe}_{11,7}\text{Co}_{0,3}\text{O}_{19}$	4,14	0,147	48	2,02	4,17	0,147	51	2,09
<b><math>\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}</math></b>								
$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$	4,17	0,188	80	4,49	4,26	0,191	110	5,21
$\text{Sr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Zn}_{0,1}\text{O}_{19}$	4,16	0,175	56	3,51	4,24	0,190	59	3,77
$\text{Sr}_{0,8}\text{Gd}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Zn}_{0,2}\text{O}_{19}$	4,04	0,153	67	2,68	4,06	0,157	72	2,98
$\text{Sr}_{0,7}\text{Gd}_{0,3}\text{Fe}_{11,7}\text{Zn}_{0,3}\text{O}_{19}$	4,06	0,130	40	1,69	4,09	0,128	56	1,77
<b><math>\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}</math></b>								
$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$	4,17	0,188	80	4,49	4,26	0,191	110	5,21
$\text{Sr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$	4,06	0,155	66	2,50	4,09	0,157	71	2,94
$\text{Sr}_{0,8}\text{Gd}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_{19}$	3,92	0,148	75	2,62	3,97	0,152	65	2,31
$\text{Sr}_{0,7}\text{Gd}_{0,3}\text{Fe}_{11,7}\text{Co}_{0,3}\text{O}_{19}$	4,00	0,134	58	1,96	4,03	0,136	59	1,99

$\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$ ,  $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$  ( $\text{M}^{2+} - \text{Zn}^{2+}, \text{Co}^{2+}$ ) увеличение параметра состава  $x$  до 0,3 приводит к постепенному уменьшению величин магнитных параметров  $B_r$ ,  $BH_c$  и  $(BH)_{\text{макс}}$  (таблица).

Следовательно, только для ферритов систем  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  зависимость остаточной магнитной индукция ( $B_r$ ), коэрцитивной силы ( $BH_c$ ) и энергетического произведения  $(BH)_{\text{макс}}$  от параметра состава  $x$  достигает наибольшего значения при  $x = 0,1$  как для изотропных постоянных магнитов, содержащих добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$  (рис. 1), так и без нее (таблица). Значения  $B_r$ ,  $BH_c$  и  $(BH)_{\text{макс}}$  изотропного постоянного магнита из  $\text{Sr}_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$ , содержащего добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ , больше на 9,9, 4,5 и 13,8 % соответственно (таблица), чем эти параметры изотропного постоянного магнита из феррита  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , также содержащего дополнительную добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ . Значения  $B_r$ ,  $BH_c$  и  $(BH)_{\text{макс}}$  изотропного постоянного магнита из феррита  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$ , содержащего добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ , больше на 2,1, 30,6 и 18,1 % соответственно (таблица), чем эти магнитные параметры изотропного постоянного магнита из феррита  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ , также содержащего добавку  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ .

Фотографии поверхности скола образцов изотропных постоянных магнитов, полученных из ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  с добавкой  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$  и без добавки  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ , представлены на рис. 2, 3 соответственно. Из рис. 2, 3 видно, что большинство кристаллитов (зерен) образцов изотропных постоянных магнитов, изготовленных из ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ , не имеют четкой огранки и их размер

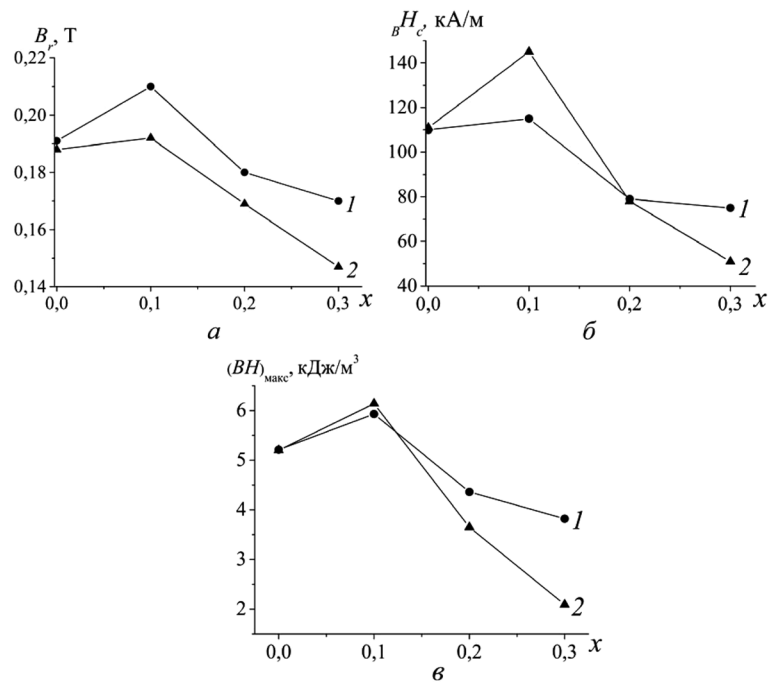


Рис. 1. Зависимости остаточной магнитной индукции ( $B_r$ ) (а), коэрцитивной силы ( $H_c$ ) (б), энергетического произведения  $(BH)_{\max}$  (в) изотропных постоянных магнитов из ферритов  $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ,  $(Ba_{0,5}Sr_{0,5})_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ , содержащих добавку  $SrFe_{9,5}Al_{2,5}O_{19}$ , от параметра состава  $x$  ( $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ (1),  $(Ba_{0,5}Sr_{0,5})_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  (2))

практически одинаков как для магнитов, содержащих дополнительную добавку  $SrFe_{9,5}Al_{2,5}O_{19}$ , так и без нее. При этом размер кристаллитов образцов изотропных магнитов, изготовленных из ферритов с  $x = 0; 0,1$ , составляет 1–2 мкм, а с  $x = 0,2$  он равен 2–3 мкм.

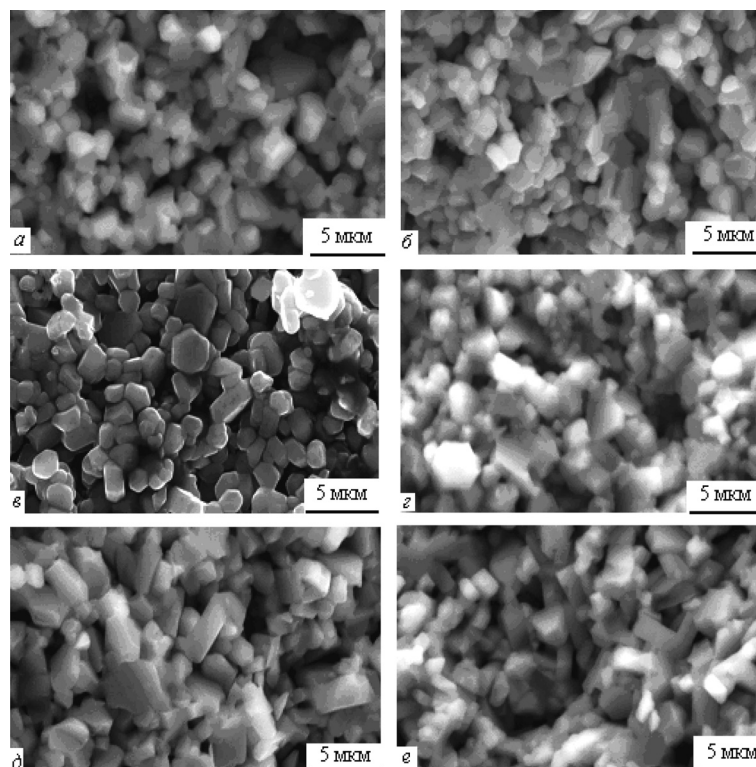


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки поверхности сколов образцов изотропных постоянных магнитов, полученных из ферритов  $Sr_{1-x}Sm_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$  ( $\times 5000$ ) ( $x = 0$  (а), 0,1 (в), 0,2 (д) – без дополнительной добавки  $SrFe_{9,5}Al_{2,5}O_{19}$ ;  $x = 0$  (б), 0,1 (г), 0,2 (е) – с дополнительной добавкой  $SrFe_{9,5}Al_{2,5}O_{19}$ )



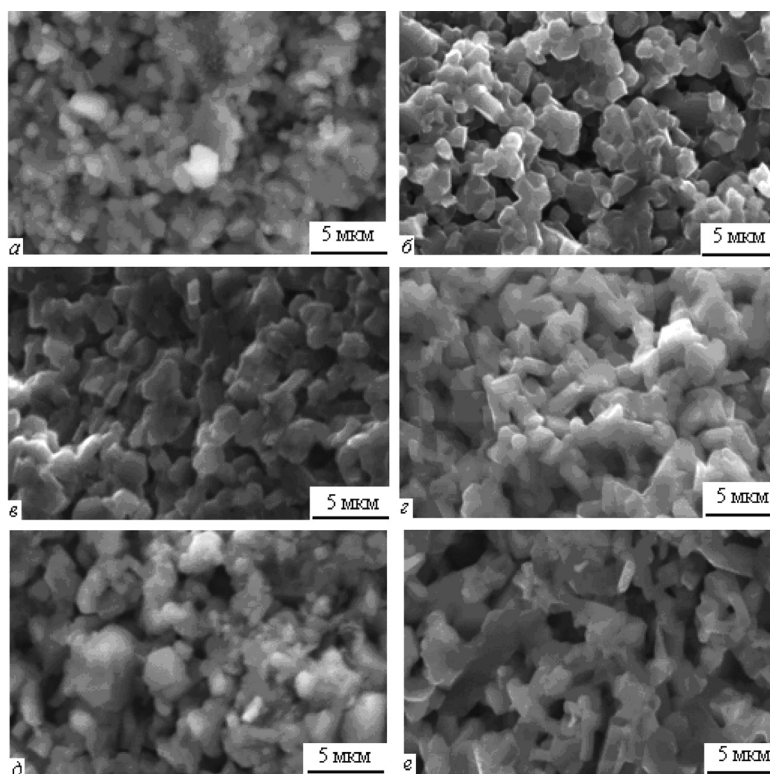


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки поверхности сколов образцов изотропных постоянных магнитов, полученных из ферритов  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $\times 5000$ ) ( $x = 0$  (а), 0,1 (б), 0,2 (в)) – без дополнительной добавки  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$ ;  $x = 0$  (б), 0,1 (г), 0,2 (д) – с дополнительной добавкой  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$

**Заключение.** Полученные результаты проведенного исследования магнитных свойств изотропных постоянных магнитов из ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Ln}_x\text{Fe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$  ( $\text{Ln}^{3+} - \text{Sm}^{3+}, \text{Gd}^{3+}; \text{M}^{2+} - \text{Co}^{2+}, \text{Zn}^{2+}$ ),  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ ) показывают, что изотропные постоянные магниты из ферритов  $\text{Sr}_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$  имеют более высокие значения остаточной магнитной индукции ( $B_r$ ), коэрцитивной силы ( $B_H$ ) и энергетического произведения  $(BH)_{\text{max}}$ , чем изотропный постоянный магнит из феррита  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ . Использование добавки  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$  позволяет повысить коэрцитивную силу и энергетическое произведение  $(BH)_{\text{max}}$  изотропных постоянных магнитов из твердых растворов ферритов  $\text{Sr}_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$ .

## Литература

1. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. Физические свойства и практическое применение. М.: ИЛ, 1962.
2. Летюк Л. М. и др. Технология производства материалов магнитоэлектроники. М.: Металлургия, 1994.
3. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. М.: Мир, 1976. Т. 2.
4. Taguchi H. et al. // J. Physique IV: JP. 1997. Vol. 7, N 1. P. c1–311– c1–312.
5. Obara J., Yamamoto H. // J. of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. 2000. Vol. 47, N 7. P. 796–800.
6. Lechevallier L. et al. // J. of Alloys and Compounds. 2003. Vol. 359. P. 310–314.
7. Wang J. F., Ponton C. B., Harris I. R. // J. of Alloys and Compounds. 2005. Vol. 403. Iss. 1–2. P. 104–109.
8. Lechevallier L. et al. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2007. Vol. 316. P. 109–111.
9. Takeyuki K. et al. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2010. Vol. 322. P. 2381–2385.
10. Lechevallier L. et al. // J. of Phys: Condens. Matter. 2008. Vol. 20. P. 175203–175212.
11. Смоленчук С. В. и др. // Весті НАН Беларусі Сер. хім. навук. 2006. № 3. С. 10–15.
12. Полько Д. Д., Башикиров Л. А., Сирота И. М. // Весті НАН Беларусі Сер. хім. навук. 2010. № 2. С. 5–8.
13. Полько Д. Д. и др. // Свиридовские чтения. Минск: БГУ, 2009. С. 104–109.
14. Башикиров Л. А. и др. // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. 2011. № 3. С. 43–50.
15. Qiao L. et al. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2007. Vol. 318. P. 74–78.

ZE WU, L. A. BASHKIROV, S. V. SLONSKAYA, S. V. SHAUCHENKA,  
V. N. SHAMBALYOV

**MAGNETIC PROPERTIES OF PERMANENT MAGNETS BASED ON M-TYPE STRONTIUM FERRITE  
WITH  $\text{Sr}^{2+}$  SUBSTITUTED BY  $\text{Sm}^{3+}$  AND  $\text{Gd}^{3+}$ ; AND  $\text{Fe}^{3+}$  SUBSTITUTED BY  $\text{Zn}^{2+}$  AND  $\text{Co}^{2+}$**

**Summary**

$\text{Sr}_{1-x}\text{Ln}_x\text{Fe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$  ( $\text{Ln}^{3+} - \text{Sm}^{3+}, \text{Gd}^{3+}; \text{M}^{2+} - \text{Co}^{2+}, \text{Zn}^{2+}$ ) and  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ ) ferrites have been prepared by solid-state method in air at 1473 K. It has been shown that isotropic permanent magnets based on  $\text{Sr}_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$  ferrites show higher values of magnetic induction ( $B_r$ ), coercive force ( ${}_B H_c$ ) and maximum energy product  $(BH)_{\text{max}}$  than ones based on  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  ferrite. It has been found that using  $\text{SrFe}_{9,5}\text{Al}_{2,5}\text{O}_{19}$  as an additive increases the coercive force ( ${}_B H_c$ ) and maximum energy product  $(BH)_{\text{max}}$  for isotropic permanent magnets from the solid solutions of  $\text{Sr}_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$ ,  $(\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5})_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{Fe}_{11,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_{19}$  ferrites.