

Научная статья

УДК 669.046.516.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-69-79

## ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАГНИТОВ Pr(Nd)–Dy(M)–Fe–Co–B (M: Tb, Ce, Sm)

А.В. Бузенков<sup>1</sup>, М.В. Бурканов<sup>1</sup>, Р.А. Валеев<sup>1</sup>, В.П. Пискорский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Исследовано влияние легирующих элементов (Tb, Ce, Sm) на свойства спеченных магнитов Pr(Nd)–Dy(M)–Fe–Co–B (M: Tb, Ce, Sm), а также температуры спекания, продолжительности помола и различных режимов термической обработки на основные магнитные характеристики и фазовый состав магнитов. Показано, что термическая обработка не оказывает значительного влияния на магнитные свойства. Установлено, что примесь самария отрицательно влияет на магнитные характеристики материалов, а наиболее эффективными являются материалы на основе празеодима (без примеси неодима).

**Ключевые слова:** динамически настраиваемый гироскоп, редкоземельные металлы, коэрцитивная сила, остаточная индукция, прямоугольность кривой размагничивания, температура спекания, режимы термической обработки, продолжительность помола порошка

**Для цитирования:** Бузенков А.В., Бурканов М.В., Валеев Р.А., Пискорский В.П. Влияние легирующих элементов и технологии получения на свойства спеченных магнитов Pr(Nd)–Dy(M)–Fe–Co–B (M: Tb, Ce, Sm) // Труды ВИАМ. 2024. № 6 (136). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-69-79.

Scientific article

## INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS AND PRODUCTION TECHNOLOGY ON THE PROPERTIES OF SINTERED MAGNETS Pr(Nd)–Dy(M)–Fe–Co–B (M: Tb, Ce, Sm)

A.V. Buzenkov<sup>1</sup>, M.V. Burkanov<sup>1</sup>, R.A. Valeev<sup>1</sup>, V.P. Piskorsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The effect of alloying elements (Tb, Ce, Sm) on the properties of sintered magnets Pr(Nd)–Dy(M)–Fe–Co–B (M: Tb, Ce, Sm) as well as sintering temperature, grinding time and various heat treatment modes on the main magnetic characteristics and phase composition of magnets is investigated. It is shown that heat treatment does not significantly affect the magnetic properties. It was found that the admixture of samarium negatively affects the magnetic characteristics of materials. It has been established that the most effective materials are based on praseodymium (without admixture of neodymium).

**Keywords:** dynamically adjustable gyroscope, rare earth metals, coercive force, residual induction, rectangularity of the demagnetization curve, sintering temperature, heat treatment modes, powder grinding duration

*For citation:* Buzenkov A.V., Burkanov M.V., Valeev R.A., Piskorsky V.P. Influence of alloying elements and production technology on the properties of sintered magnets Pr(Nd)–Dy(M)–Fe–Co–B (M: Tb, Ce, Sm). *Trudy VIAM*, 2024, no. 6 (136), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-69-79.

### **Введение**

В настоящее время наиболее перспективным типом гироскопа является роторный вибрационный динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ) – отличительная особенность его конструкции заключается в наличии упругого соединения вращающегося ротора и вала, работоспособность которого обеспечивает электродвигатель, его торсионы создают дополнительную степень свободы для вращения относительно оси. Основные преимущества ДНГ – небольшие размеры, низкая погрешность измерений, а также сравнительно невысокая стоимость производства. Инерциальным называется пространство с тремя взаимно ортогональными осями координат, жестко связанное с неподвижными звездами. Планета Земля не является инерциальным пространством, так как она вращается относительно неподвижных звезд с угловой скоростью 15 градусов в час [1]. Главное свойство инерциальной системы отсчета – в этой системе выполняются законы Ньютона, т. е. любое свободное тело движется прямолинейно и равномерно либо покоится. Гироскоп применяется для измерения абсолютного углового отклонения движущегося тела [2, 3]. Размерность угловой скорости: 1 градус в час = 1 угловая минута в минуту = 1 угловая секунда в секунду. Динамически настраиваемый гироскоп применяется в качестве чувствительного элемента в индикаторных гиросtabilизаторах и беспилотных инерциальных навигационных системах [3] и обладает следующими достоинствами: небольшими габаритными размерами и массовыми характеристиками, относительно невысокой стоимостью, высокими надежностью и точностью. В последнее время для создания таких малогабаритных систем используются ДНГ массой до 0,1 кг [4]. В соответствии с требованиями эти приборы должны иметь диапазон измерений до 200 градусов/с и случайное отклонение оси порядка 0,01–0,1 градусов/ч [4]. С увеличением массива целей, преследуемых искусственными спутниками Земли, значительно повышаются значения величин, характеризующих их точность позиционирования, соответственно, возрастают требования и к самим навигационным системам. В качестве примера можно отметить, что таким требованиям к точному позиционированию должны соответствовать аппараты преимущественно космической отрасли приборостроения, неизменной особенностью которых является наличие оптических приборов, а также навигационных систем, функционирующих в аналогичной безвоздушной атмосфере. Важным показателем для приборов навигации искусственных спутников Земли является степень воспроизводимости результатов в гироскопах, являющихся чувствительными элементами всего агрегата [5]. По отношению точности к стоимости, а также массогабаритным параметрам, ДНГ можно отнести к одним из наиболее производительных типов приборов, исходя из результатов различных исследований. С течением времени в конструкцию ДНГ было внесено множество изменений (модификаций), в связи с этим были достигнуты новые показатели эффективности их работы. Количество оборотов ротора современного ДНГ достигает 30000 об/мин и может доходить до 60000 об/мин [6]. Неконтактные гироскопы имеют сверхвысокую точность, так как с их помощью удалось достичь значений  $10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-4}$  градусов/ч [1]. Частота вращения ротора двигателя гироскопа составила 500 Гц, а точнее 500 градусов/с. В работе [4] авторами установлено, что скорость, с которой вращается ротор ДНГ-091 составляет 30000 об/мин или 500 об/с. Масса такого гироскопа 125 г, габаритные

размеры  $\varnothing 32 \times 37$  мм, диапазон измеряемых угловых скоростей 10 градусов/с, ресурс 140 тыс. ч, время готовности 8 с [4].

Основным функциональным элементом – как в ДНГ, так и в акселерометрах – является магнитный элемент, к которому ввиду его высокой ответственности выдвигаются определенные требования – в первую очередь температурная и временная стабильность его остаточной индукции ( $B_R$ ) при максимально возможной ее величине. Второе требование – это возможность серийного изготовления и доступность технологического обеспечения кольцевых магнитов с радиальной текстурой (КМРТ). Это, пожалуй, самый сложный для изготовления тип магнитов. В КМРТ неизбежно будут присутствовать растягивающие (в случае материалов на основе системы Sm–Co) либо сжимающие (в случае материалов на основе неодима или празеодима) напряжения. Причем растягивающие напряжения превышают предел прочности материала при разрыве. Именно по этой причине в настоящее время считается невозможным изготовление «цельных» КМРТ из материалов системы Sm–Co [4, 5].

Их изготавливают только из отдельных сегментов, которые вырезают из магнитов в форме призм. Очевидно, что в результате это приводит к неоднородному распределению магнитного поля на поверхности КМРТ, что резко снижает точность гироскопа данного типа [7, 8].

Формирование опережающего научно-технического задела и реализация итоговой технической системы, основным функциональным элементом которой в данном случае является спеченный магнит, допустимы не в последнюю очередь благодаря неразрывно связанным между собой фундаментальным и поисковым исследованиям [9]. Именно поэтому в данной статье рассмотрена возможность применения самых популярных на рынке и наиболее подходящих для изготовления постоянных магнитов ДНГ материалов, а также приведены их свойства.

### Материалы и методы

Выплавку слитков на основе различных металлов, включая празеодим (PrM-1), неодим (NM-1), диспрозий (ДиМ-1), тербий, самарий, церий и кобальт (K0), а также железо (АРМКО тип 1), производили в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002. На поверхность набивного тигля наносили жаростойкое покрытие из инертной керамики на основе оксида циркония, предварительно стабилизированного оксидом иттрия. Бор вводится в плавку посредством сплава железа и бора. Сплавы получали с использованием аргона в качестве защитной атмосферы (ГОСТ 10157–79) в камере вакуумной индукционной печи. Дробление слитка до порошка фракцией не более 630 мкм проводили в инертной среде – в атмосфере аргона. Для тонкого помола применяли мельницу центробежно-планетарного типа модели САНД-1 длительностью 25 мин. Для предотвращения окисления использовали жидкость для помола с формулой  $C_2F_3Cl_3$  и температурой кипения 47,5 °С. Преимущества этой жидкости заключаются в том, что она совершенно не смешивается с водой, т. е. предохраняет порошок от окисления. Заготовки магнитов призматической формы получены путем их прессования в перпендикулярном направлении в поле с интенсивностью 800 кА/м. Жидкофазное спекание заготовок магнитов проводили в вакуумной электропечи ВЕГА-1 при температурах 1100–1130 °С в течение 60 мин в вакууме ( $10^{-5}$  мм рт. ст.). На некоторых образцах после спекания проводили термическую обработку в вакууме  $10^{-5}$  мм рт. ст. при температуре 1000 °С и длительности 1 ч с последующей выдержкой при температуре 530 °С в течение 2 ч соответственно. На некоторых образцах эти режимы термообработки проводили последовательно. Из спеченных заготовок изготавливали образцы сферической формы размером 2–3 мм. Плотность измеряемых образцов определяли с помощью взвешивания в

дистиллированной воде и на воздухе [7]. Исследование локального состава фаз проводили методом качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) с применением энергодисперсионного анализатора. Локальность анализа составляет  $1 \text{ мкм}^2$ , глубина анализа  $1 \text{ мкм}$  [8]. Измерения магнитных параметров образцов магнитов производили при испытании на вибрационном магнитометре типа «Меридиан» в полях с интенсивностью до  $1600 \text{ кА/м}$  при температуре  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . При намагничивании образцов ориентировка их текстуры должна сохранять параллельность относительно магнитного поля вибрационного магнитометра, пронизанного внешним магнитным полем. В научно-технических литературных источниках [10–14] более подробно описаны математические формулы, при применении которых становится возможным определение размагничивающего фактора для моделей магнитов, выполненных не только в форме сферы, но и в любой необходимой форме. Работы выполнены с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

В табл. 1 и 2 представлены результаты МРСА спеченных материалов  $(\text{Nd}_{0,61-x}\text{Dy}_{0,39}\text{Sm}_x)_{17,5}(\text{Fe}_{0,72}\text{Co}_{0,28})_{76,3}\text{B}_{6,2}$  ( $x = 0,01-0,12$ ) и  $(\text{Nd}_{0,73-x}\text{Dy}_{0,27}\text{Sm}_x)_{15,5}(\text{Fe}_{0,83}\text{Co}_{0,17})_{76,3}\text{B}_{6,5}$  ( $x = 0,01-0,06$ ).

Таблица 1

Состав фаз спеченного материала  $(\text{Nd}_{0,61-x}\text{Dy}_{0,39}\text{Sm}_x)_{17,5}(\text{Fe}_{0,72}\text{Co}_{0,28})_{76,3}\text{B}_{6,2}$

Параметр $x$	Фаза	Состав фазы в атомных долях	R/F
0,15	$\text{R}_2\text{F}_{14}\text{B}$	$(\text{Nd}_{0,41}\text{Dy}_{0,49}\text{Sm}_{0,10})_2(\text{Fe}_{0,79}\text{Co}_{0,21})_{14}\text{B}$	0,40
	$\text{RF}_2\text{B}_2$	$(\text{Nd}_{0,29}\text{Dy}_{0,66}\text{Sm}_{0,05})(\text{Fe}_{0,63}\text{Co}_{0,37})_2\text{B}_2$	1,30
	$\text{RF}_2\text{B}_2$	$(\text{Nd}_{0,49}\text{Dy}_{0,39}\text{Sm}_{0,12})(\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,38})_2\text{B}_2$	0,98
0,07	$\text{R}_2\text{F}_{14}\text{B}$	$(\text{Nd}_{0,45}\text{Dy}_{0,50}\text{Sm}_{0,05})_2(\text{Fe}_{0,79}\text{Co}_{0,21})_{14}\text{B}$	0,40
	$\text{RF}_4\text{B}$	$(\text{Nd}_{0,43}\text{Dy}_{0,52}\text{Sm}_{0,05})(\text{Fe}_{0,64}\text{Co}_{0,36})_4\text{B}$	0,67
	$\text{RF}_3\text{B}_2$	$(\text{Nd}_{0,51}\text{Dy}_{0,45}\text{Sm}_{0,04})_3(\text{Fe}_{0,64}\text{Co}_{0,36})_3\text{B}_2$	0,93
	$\text{RF}_2\text{B}_2$	$(\text{Nd}_{0,70}\text{Dy}_{0,66}\text{Sm}_{0,05})(\text{Fe}_{0,63}\text{Co}_{0,37})_2\text{B}_2$	1,30
0,04	$\text{R}_2\text{F}_{14}\text{B}$	$(\text{Nd}_{0,45}\text{Dy}_{0,53}\text{Sm}_{0,06})_2(\text{Fe}_{0,79}\text{Co}_{0,21})_{14}\text{B}$	0,42
	$\text{RF}_3\text{B}_2$	$(\text{Nd}_{0,43}\text{Dy}_{0,25}\text{Sm}_{0,03})_3(\text{Fe}_{0,57}\text{Co}_{0,43})_3\text{B}_2$	1,48
	$\text{RF}_3$	$(\text{Nd}_{0,51}\text{Dy}_{0,48}\text{Sm}_{0,01})(\text{Fe}_{0,64}\text{Co}_{0,36})_3$	1,04

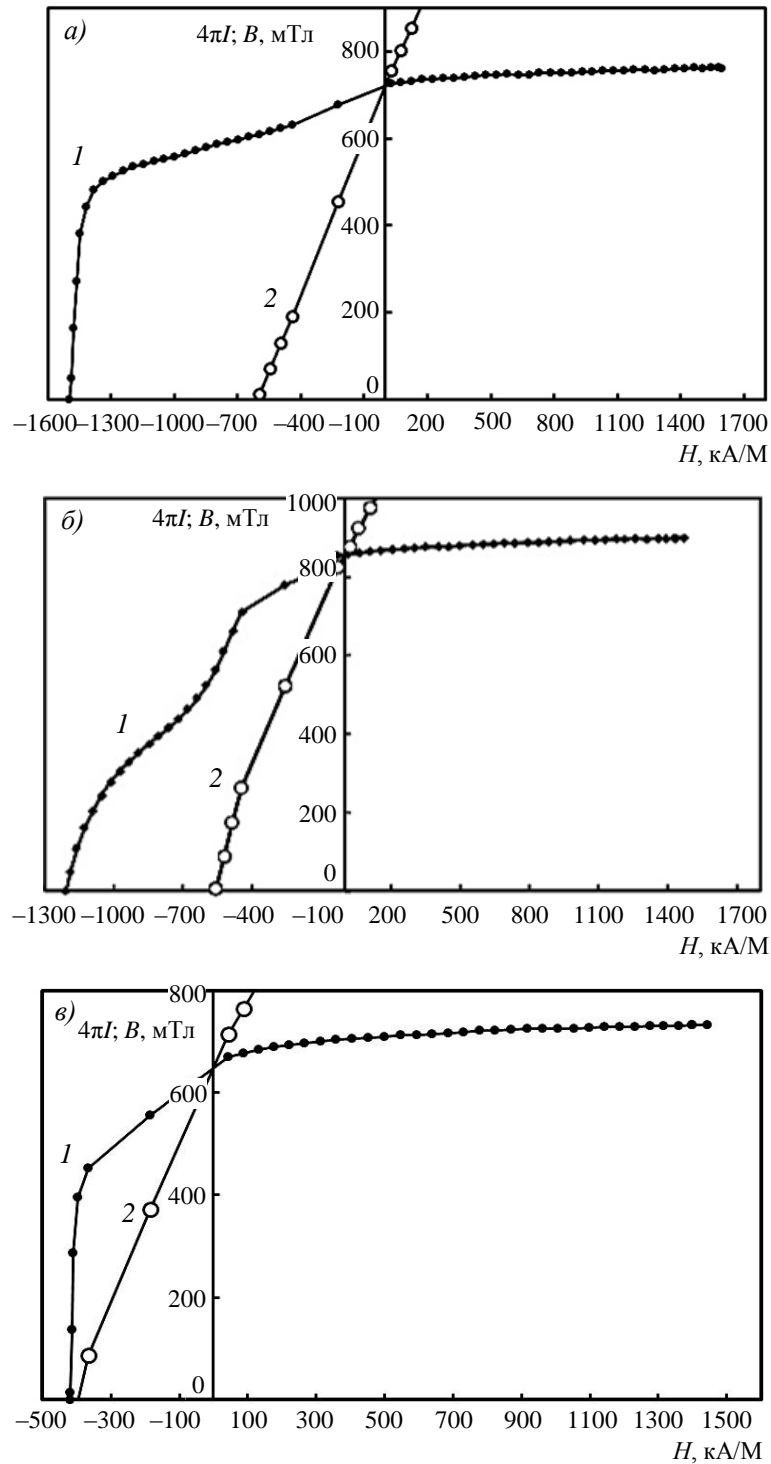
Таблица 2

Состав фаз спеченного материала  $(\text{Nd}_{0,73-x}\text{Dy}_{0,27}\text{Sm}_x)_{15,5}(\text{Fe}_{0,83}\text{Co}_{0,17})_{76,3}\text{B}_{6,5}$

Параметр $x$	Фаза	Состав фазы в атомных долях	R/F
0,12	$\text{R}_2\text{F}_{14}\text{B}$	$(\text{Nd}_{0,62}\text{Dy}_{0,32}\text{Sm}_{0,06})_2(\text{Fe}_{0,87}\text{Co}_{0,13})_{14}\text{B}$	0,43
	$\text{RF}_2$	$(\text{Nd}_{0,74}\text{Dy}_{0,20}\text{Sm}_{0,06})(\text{Fe}_{0,61}\text{Co}_{0,59})_2$	1,53
0,09	$\text{R}_2\text{F}_{14}\text{B}$	$(\text{Nd}_{0,63}\text{Dy}_{0,35}\text{Sm}_{0,02})_2(\text{Fe}_{0,86}\text{Co}_{0,14})_{14}\text{B}$	0,47
	$\text{RF}_2$	$(\text{Nd}_{0,76}\text{Dy}_{0,21}\text{Sm}_{0,03})(\text{Fe}_{0,61}\text{Co}_{0,39})_2$	1,58
0,05	$\text{R}_2\text{F}_{14}\text{B}$	$(\text{Nd}_{0,59}\text{Dy}_{0,40}\text{Sm}_{0,01})_2(\text{Fe}_{0,87}\text{Co}_{0,13})_{14}\text{B}$	0,44
	$\text{RF}_2$	$(\text{Nd}_{0,69}\text{Dy}_{0,30}\text{Sm}_{0,01})(\text{Fe}_{0,63}\text{Co}_{0,37})_2$	1,57

Кривые размагничивания по намагниченности и по индукции некоторых материалов, исследованные при температуре  $20 \pm 5$  °С, представлены на рисунке.

Данные по изготовлению и измерению представленных материалов, в том числе и после различных режимов термической обработки, приведены в табл. 3.



Кривые размагничивания по намагниченности  $4\pi I$  (1) и по индукции  $B$  (2) спеченных материалов:  $(Pr_{0.53}Dy_{0.47})_{13.28}(Fe_{0.77}Co_{0.23})_{78.86}B_{7.86}$  (а),  $(Nd_{0.28}Pr_{0.27}Dy_{0.25}Tb_{0.04}Sm_{0.02}Ce_{0.14})_{14.72}(Fe_{0.79}Co_{0.21})_{79.10}B_{6.18}$  (б) и  $(Nd_{0.54}Dy_{0.37}Tb_{0.02}Sm_{0.07})_{17.33}(Fe_{0.72}Co_{0.28})_{76.48}B_{6.19}$  (в)

Таблица 3

## Температуры спекания и свойства исследованных материалов при температуре 20±5 °С

Условный номер строки	Состав материала, % (атомн.)	Температура спекания, °С	τ, мин	Режим термической обработки	ρ, кг/м <sup>3</sup>	кА/м			4πI <sub>S</sub>	B <sub>R</sub>	SF
						H <sub>ci</sub>	H <sub>св</sub>	H <sub>к</sub>			
1	(Pr <sub>0,33</sub> Dy <sub>0,47</sub> ) <sub>13,28</sub> (Fe <sub>0,77</sub> Co <sub>0,23</sub> ) <sub>78,86</sub> B <sub>7,86</sub>	1120	25	Без обработки	7720	1497	597	440	763	755	0,29
2	(Pr <sub>0,42</sub> Dy <sub>0,58</sub> ) <sub>13,17</sub> (Fe <sub>0,76</sub> Co <sub>0,24</sub> ) <sub>78,90</sub> B <sub>7,93</sub>	1120	25	Без обработки	7680	1681	593	500	714	745	0,30
3	(Nd <sub>0,28</sub> Pr <sub>0,27</sub> Dy <sub>0,29</sub> Ce <sub>0,16</sub> ) <sub>14,72</sub> (Fe <sub>0,79</sub> Co <sub>0,21</sub> ) <sub>79,10</sub> B <sub>6,18</sub>	1130	25	При 530 °С, 2 ч	7560	1206	558	447	858	876	0,37
4	(Nd <sub>0,30</sub> Pr <sub>0,28</sub> Dy <sub>0,29</sub> Ce <sub>0,14</sub> ) <sub>14,61</sub> (Fe <sub>0,80</sub> Co <sub>0,20</sub> ) <sub>79,26</sub> B <sub>6,13</sub>	1130	25	При 1000 °С, 1 ч + 530 °С, 2 ч	7530	1156	559	456	889	869	0,39
5	(Nd <sub>0,36</sub> Pr <sub>0,30</sub> Dy <sub>0,29</sub> Ce <sub>0,06</sub> ) <sub>14,27</sub> (Fe <sub>0,80</sub> Co <sub>0,20</sub> ) <sub>79,75</sub> B <sub>5,98</sub>	1130	25	При 1000 °С, 1 ч + 530 °С, 2 ч	7530	1091	685	464	905	845	0,43
6	(Nd <sub>0,57</sub> Dy <sub>0,39</sub> Sm <sub>0,04</sub> ) <sub>17,11</sub> (Fe <sub>0,72</sub> Co <sub>0,28</sub> ) <sub>76,66</sub> B <sub>6,23</sub>	1130	35	Без обработки	7800	331	319	137	687	668	0,41
7	(Nd <sub>0,54</sub> Dy <sub>0,39</sub> Sm <sub>0,07</sub> ) <sub>17,33</sub> (Fe <sub>0,72</sub> Co <sub>0,28</sub> ) <sub>76,48</sub> B <sub>6,19</sub>	1120	35	Без обработки	7890	420	398	184	722	716	0,44
8	(Nd <sub>0,49</sub> Dy <sub>0,39</sub> Sm <sub>0,12</sub> ) <sub>17,66</sub> (Fe <sub>0,72</sub> Co <sub>0,28</sub> ) <sub>76,21</sub> B <sub>6,13</sub>	1100	35	При 1000 °С, 1 ч	7890	313	308	143	680	658	0,46

Примечание. ρ – плотность спеченного материала; τ – продолжительность помола; H<sub>ci</sub> – коэрцитивная сила по намагниченности; H<sub>св</sub> – коэрцитивная сила по индукции; H<sub>к</sub> – поле «колена»; 4πI<sub>S</sub> – намагниченность насыщения; B<sub>R</sub> – остаточная индукция; SF – коэффициент прямоуглольности кривой размагничивания.

Эти материалы отличаются друг от друга в основном процентным содержанием кобальта. По данным, приведенным в табл. 1, можно сделать вывод о том, что в материале после спекания помимо основной магнитной фазы  $R_2F_{14}B$  ( $F: Fe + Co$ ,  $R$  – металлы и редкоземельные металлы (РЗМ)) присутствуют и другие фазовые составы. Фаза  $RF_2B_2$  имеет тетрагональную решетку и существует при полном замещении железа на кобальт [14, 15]. При переходе от «легких» к «тяжелым» РЗМ параметры решетки этой фазы уменьшаются [16]. Температура магнитного упорядочения (в данном случае температура Нееля) низкая. Так, для соединения  $TbCo_2B_2$  она равна 19 К [15]. По данным научно-технических литературных источников [17, 18], присутствие фазы  $RF_4B$ , которая, имея структуру типа  $CeCo_4B$ , существует для всех  $R$  за исключением европия и итербия, когда железо замещено кобальтом (табл. 1). Температура Кюри при этом имеет значение  $\sim 700$  К [18]. Кристаллическая решетка гексагональная и в подавляющем большинстве исследований находится в кристаллографической анизотропии типа «легкая» плоскость [19]. Рассмотрим фазу  $RF_3B_2$ , представленную в табл. 1. Это соединение имеет достаточно низкую температуру Кюри, которая составляет  $\sim 140$  К [20]. Данный факт не влияет на характеристики магнитов, применяемых в наземных и воздушных приборах из-за их парамагнетизма. Анализируя данные табл. 1, авторами данной работы сделан вывод, что в материале присутствует фаза  $RF_3$  – соединение, по данным источника [21], представляющее собой в кристаллографическом объеме структуру ромбоэдра. Температура Кюри соединения  $ThFe_3$  равна 428 К [22], следовательно, такого же порядка эта величина и у соединения  $RFe_3$ . В табл. 2, кроме рассмотренных фаз, присутствует фаза Лавеса  $RF_2$ , имеющая состав  $(Nd_{0,74}Dy_{0,20}Sm_{0,06})(Fe_{0,61}Co_{0,59})_2$ , несколько меняющийся в зависимости от содержания кобальта. В работе [23] исследовано соединение  $Nd_xGd_{1-x}Co_2$ . Проверено, что при замене неодима на гадолиний температура Кюри увеличивается со 113 до 416 К. По-видимому, это относится к любому «тяжелому» РЗМ – например, диспрозию. В работе [24] показано, что фаза Лавеса растворяет в себе бор. При этом с увеличением содержания бора температура Кюри увеличивается. Так, в соединении  $Tb_{0,70}Pr_{0,30}(Fe_{1-x}B_x)_2$  она увеличивается с 665 ( $x = 0$ ) до 680 К, когда  $x = 0,3$  [24]. Элементарная ячейка фазы Лавеса представлена в виде кубической симметрии  $C15$  (пространственная группа  $Fd3m-O7h$ ) и содержит восемь формульных единиц [25]. В процессе анализа данных табл. 3 (строки 6–8) становится очевидным, что с повышением процентного содержания самария (диспрозий при этом не претерпевает изменения процентного содержания) значения коэрцитивной силы по намагниченности ( $H_{ci}$ ) и по индукции ( $H_{cB}$ ) уменьшаются (хотя и не монотонно). Осуществить это за счет уменьшения температуры спекания вряд ли возможно, поскольку плотность металла практически не меняется. Уменьшаются также значения намагниченности насыщения ( $4\pi I_S$ ) и остаточной индукции ( $B_R$ ). Величина прямоугольности кривой размагничивания ( $SF$ ) практически не изменяется. Легирование церием (строки 3–5 в табл. 3), наоборот, приводит к увеличению величины  $H_{ci}$ , а значение  $4\pi I_S$  уменьшается; возрастает также величина  $B_R$ . При исследовании данных табл. 3 (строки 1–2) становится очевидным, что спеченные образцы, не содержащие неодима, имеют более высокие значения величин  $H_{ci}$ ,  $H_{cB}$ ,  $H_K$ , но более низкие значения  $SF$ . Так называемое поле «колена» ( $H_K$ ) – это такое поле, при котором намагниченность составляет 90 % от остаточной намагниченности [26].

Следует обратить внимание, что при увеличении продолжительности помола до 35 мин возрастают величина прямоугольности кривой размагничивания (табл. 3, строки 6–8) и плотность материала, но значительно уменьшается коэрцитивная сила. Как видно из данных табл. 3, увеличение продолжительности помола до 35 мин привело к уменьшению магнитных характеристик. В работе [27] показано, что для магнитов

NdFeB (и вообще РЗМ-магнитов) существует оптимальная продолжительность помола, увеличение которой приводит к ухудшению их характеристик (в основном из-за окисления порошка в процессе помола). Как видно из данных табл. 3, термическая обработка также не оказывает положительного влияния на свойства образцов. Следует обратить внимание на то, что свойства материалов на основе празеодима выше, чем на основе неодима (табл. 3). Отличие этих магнитов в том, что, по данным работы [27], скорость взаимной диффузии в материалах на основе неодима выше, чем в материалах, большую часть которых составляет другой РЗМ-металл – празеодим. В рамках исследований следует также обратить внимание на легирование сплавов самарием (табл. 3, строки 6–8), который не оказывает положительного влияния на магнитные свойства из-за особенностей строения его иона (в основном поле анизотропии и его ориентация) [28–31].

### Заключения

Установлено, что примесь самария отрицательно влияет на магнитные свойства материалов, а наиболее эффективными являются материалы на основе празеодима (без примеси неодима).

Показано, что применение термической обработки не оказывает значительного положительного влияния на магнитные свойства.

### Список источников

1. Мартыненко Ю.Г. Тенденции развития современной гироскопии // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 11. С. 120–127.
2. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
3. Mahony R., Kumar V., Corke P. *Multicopter Aerial Vehicle Dynamics, Stability and Control: Towards a Full Estimation*. Springer, 2012. P. 20–32.
4. Лавойе Ф. Ди Ли, Ландри Р. Разработка инерциальной навигационной системы на МЭМС датчиках // Гироскопия и навигация. 2009. № 1 (64). С. 75–85.
5. Чиркин Д.С., Рословец П.В., Татаринцов Ф.В., Новиков Л.З. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 1. С. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
6. Топильская С.В., Бородулин Д.С., Корнюхин А.В. Экспериментальная оценка допустимых механических воздействий на динамически настраиваемый гироскоп // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2018. № 4. С. 69–79.
7. Московская Т.Э. Определение плотности тел гидростатическим взвешиванием: методические рекомендации. Иркутск: Иркутск. гос. ун-т, 2003. С. 1–9.
8. Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Влияние высоких концентраций кобальта на свойства магнитов Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
9. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
10. Лаптева К.А., Толмачев И.И. Расчет размагничивающего фактора при продольном намагничивании в магнитопорошковой дефектоскопии // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 2. С. 140–144.
11. Sato M., Ishii Y. Simple and approximate expressions of demagnetizing factors of uniformly magnetized rectangular rod and cylinder // *Journal of Applied Physics*. 1989. Vol. 66. No. 2. P. 983–985.
12. Chen Du-Xing, Brug J.A., Goldfarb R.B. Demagnetizing factor for cylinder // *IEEE Transactions on Magnetism*. 1991. Vol. 27. No. 4. P. 3601–3619.

13. Sinnema S., Franse J.J.J., Radwanski R.J. et al. Magnetic measurements on  $R_2Fe_{14}B$  and  $R_2Co_{14}B$  compounds in high fields // *Le Journal de Physique Colloques*. 1985. Vol. 46. P. C6-301–C6-304.
14. Herbst J.F.  $R_2Fe_{14}B$  materials: intrinsic properties and technological properties and technological aspects // *Reviews of Modern Physics*. 1991. Vol. 63. No. 4. P. 819–898.
15. Szytula A., Ivanov V., Vinokurova L. Magnetic properties of the  $RT_2X_2$ ,  $RTX_2$  and  $RTX$  compounds in high magnetic field // *Acta Physica Polonica A*. 1994. Vol. 85. P. 293–296.
16. Koichi Niihara, Toetu Shishido, Selshi Yajima. The crystal data of ternary rare earth borides  $RCO_2B_2$  // *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 1979. Vol. 46. P. 1137–1140.
17. Aby S.N., Hadjipanayis G.C. Magnetic properties of amorphous and crystallized  $RT_4B$  alloys // *Journal of Applied Physics*. 1987. Vol. 61. No. 8. P. 3757–3759.
18. Drzazga Z., Winiarska A., Stein F. Magnetic properties of  $RCO_{4-x}Fe_xB$  compounds ( $R=Gd, Dy$ ) // *Journal of the Less-Common Metals*. 1989. Vol. 153. P. L21–L24.
19. Gros F., Hartman-Boutron D.F., Meyer C. et al. Mossbauer study of compounds  $RCO_{4-x}Fe_xB$  and  $RFe_4B$  // *Journal de Physique*. 1988. Vol. 49. No. 12. P. C8-547–C8-548.
20. Nguyen Minh Hong. Ferromagnetism in  $CeCo_3B_2$  // *Communications in Physics*. 2007. Vol. 17. No. 4. P. 241–245.
21. De Cunha J.B.M., Viccaro P.J., Vasquez A. A Mossbauer study of the spin-reorientation in the pseudobinary intermetallic compounds  $(Er_{10x}Gd_x)Fe_3$  // *Hyperfine Interactions*. 1983. Vol. 15/16. P. 697–700.
22. de Grood C.H., Buschow K.H.J., de Boer F.R. Re-entrant ferromagnetism in the  $ThFe_{3-x}Al_x$  system // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1996. Vol. 157/158. P. 641–642.
23. Primavesi G.J., Taylor K.N.R., Harris L.R. Structural and magnetic studies of the pseudo-binary compounds  $(Gd_{1-x}Nd_x)Co_2$  // *Journal de Physique*. 1971. Vol. 32. P. C1-661–C1-662.
24. Ren W.J., Zhang Z.D., Markosyan A.S. et al. The beneficial effect of the boron substitution on the magnetostrictive compound  $Tb_{0.7}Pr_{0.3}Fe_2$  // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. Vol. 34. P. 3024–3027.
25. Умхаева З.С. Структурные и магнитные фазовые превращения и сверхтонкие взаимодействия на ядре  $^{57}Fe$  в фазах высокого давления сплавов квазибинарных систем  $R^{1-x}R^xM_2$  и  $R(Fe_{1-x}M_x)_2$  ( $R=P3M$ ),  $M=3d$ -металл: дис. ... д-ра ф.-м. наук. Грозный, 2013. 339 с.
26. Perigo E.A., Takiishi H., Motta C.C., Faria R.N. On the squareness factor behavior of RE-FeB ( $RE=Nd$  or  $Pr$ ) magnets above room temperature // *IEEE Transaction Magnetic*. 2009. Vol. 45. No. 3. P. 4431–4434.
27. Takiishi H., Lima L.F.C.P., Costa I., Faria R.N. The influence of process parameters and alloy structure on the magnetic properties of NdDyFeB HD sintered magnets // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 152. P. 1–8.
28. Faria R.N., Davies B.E., Brown D.N., Harris I.R. Microstructural and magnetic studies of cast and annealed Nd and PrFeCoBZr alloys and HDDR materials // *Journal of Alloys and Compounds*. 2000. Vol. 296. P. 223–228.
29. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Температурная стабильность редкоземельных магнитов, поддерживаемая с помощью магнитокалорического эффекта // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
30. Бузенков А.В., Валеев Р.А., Пискорский В.П., Моргунов Р.Б. Влияние содержания иттрия на свойства спеченных магнитов Nd–Dy–Y–Fe–Co–B // *Труды ВИАМ*. 2022. № 4 (110). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117.
31. Пискорский В.П., Валеев Р.Б., Королев Д.В., Столянков Ю.В., Моргунов Р.Б. Технологии магнитооптической записи информации на тонких пленках редкоземельных магнитомягких сплавов. Часть II. Сверхбыстрое полностью оптическое переключение намагниченности // *Труды ВИАМ*. 2020. № 2 (86). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-10-21.

## References

1. Martynenko Yu.G. Trends in the development of modern gyroscopy. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 1997, no. 11, pp. 120–127.
2. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Fundamentals of constructing strapdown inertial navigation systems*. St. Petersburg: Concern «Central Research Institute «Electropribor», 2009, 280 p.
3. Mahony R., Kumar V., Corke P. *Multirotor Aerial Vehicle Dynamics, Stability and Control: Towards a Full Estimation*. Springer, 2012, pp. 20–32.
4. Lavoie F. Di Li, Landry R. Development of an inertial navigation system based on MEMS sensors. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2009, no. 1 (64), pp. 75–85.
5. Chirkin D.S., Roslovets P.V., Tatarinov F.V., Novikov L.Z. Reducing the drift of a dynamically tuned gyroscope from launch to launch. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
6. Topilskaya S.V., Borodulin D.S., Kornukhin A.V. Experimental assessment of permissible mechanical influences on a dynamically adjustable gyroscope. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Priborostroyeniye*, 2018, no. 4, pp. 69–79.
7. Moscovskaya T.E. *Definition of density of bodies hydrostatic weighing: methodical recommendations*. Irkutsk: Irkutsk state univ., 2003, pp. 1–9.
8. Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. The effect of high concentrations of cobalt on the properties of magnets Pr–Dy–Fe–Co–B and Nd–Dy–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 25, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
9. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
10. Lapteva K.A., Tolmachev I.I. Calculation of the demagnetizing factor during longitudinal magnetization in magnetic particle flaw detection. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 140–144.
11. Sato M., Ishii Y. Simple and approximate expressions of demagnetizing factors of uniformly magnetized rectangular rod and cylinder. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 66, no. 2, pp. 983–985.
12. Chen Du-Xing, Brug J.A., Goldfarb R.B. Demagnetizing factor for cylinder. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, vol. 27, no. 4, pp. 3601–3619.
13. Sinnema S., Franse J.J.J., Radwanski R.J. et al. Magnetic measurements on  $R_2Fe_{14}B$  and  $R_2Co_{14}B$  compounds in high fields. *Le Journal de Physique Colloques*, 1985, vol. 46, pp. C6-301–C6-304.
14. Herbst J.F.  $R_2Fe_{14}B$  materials: intrinsic properties and technological properties and technological aspects. *Reviews of Modern Physics*, 1991, vol. 63, no. 4, pp. 819–898.
15. Szytula A., Ivanov V., Vinokurova L. Magnetic properties of the  $RT_2X_2$ ,  $RTX_2$  and  $RTX$  compounds in high magnetic field. *Acta Physica Polonica A*, 1994, vol. 85, pp. 293–296.
16. Koichi Niihara, Toetu Shishido, Selshi Yajima. The crystal data of ternary rare earth borides  $RCO_2B_2$ . *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1979, vol. 46, pp. 1137–1140.
17. Aby S.N., Hadjipanayis G.C. Magnetic properties of amorphous and crystallized  $RT_4B$  alloys. *Journal of Applied Physics*, 1987, vol. 61, no. 8, pp. 3757–3759.
18. Drzazga Z., Winiarska A., Stein F. Magnetic properties of  $RCO_{4-x}Fe_xB$  compounds ( $R=Gd, Dy$ ). *Journal of the Less-Common Metals*, 1989, vol. 153, pp. L21–L24.
19. Gros F., Hartman-Boutron D.F., Meyer C. et al. Mossbauer study of compounds  $RCO_{4-x}Fe_xB$  and  $RFe_4B$ . *Journal de Physique*, 1988, vol. 49, no. 12, pp. C8-547–C8-548.
20. Nguyen Minh Hong. Ferromagnetism in  $CeCo_3B_2$ . *Communications in Physics*, 2007, vol. 17, no. 4, pp. 241–245.
21. De Cunha J.B.M., Viccaro P.J., Vasquez A. A Mossbauer study of the spin-reorientation in the pseudobinary intermetallic compounds  $(Er_{10x}Gd_x)Fe_3$ . *Hyperfine Interactions*, 1983, vol. 15/16, pp. 697–700.
22. de Grood C.H., Buschow K.H.J., de Boer F.R. Re-entrant ferromagnetism in the  $ThFe_{3-x}Al_x$  system. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, vol. 157/158, pp. 641–642.

23. Primavesi G.J., Taylor K.N.R., Harris L.R. Structural and magnetic studies of the pseudo-binary compounds  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_2$ . *Journal de Physique*, 1971, vol. 32, pp. C1-661–C1-662.
24. Ren W.J., Zhang Z.D., Markosyan A.S. et al. The beneficial effect of the boron substitution on the magnetostrictive compound  $\text{Tb}_{0.7}\text{Pr}_{0.3}\text{Fe}_2$ . *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, vol. 34, pp. 3024–3027.
25. Umkhaeva Z.S. *Structural and magnetic phase transformations and hyperfine interactions on the  $^{57}\text{Fe}$  nucleus in high-pressure phases of alloys of quasi-binary systems  $\text{R}_{1-x}\text{R}'_x\text{M}_2$  and  $\text{R}(\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x)_2$  (R-REM), M-3d-metal*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Grozny, 2013, 339 p.
26. Perigo E.A., Takiishi H., Motta C.C., Faria R.N. On the squareness factor behavior of RE-FeB (RE=Nd or Pr) magnets above room temperature. *IEEE Transaction Magnetic*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 4431–4434.
27. Takiishi H., Lima L.F.C.P., Costa I., Faria R.N. The influence of process parameters and alloy structure on the magnetic properties of NdDyFeB HD sintered magnets. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 152, pp. 1–8.
28. Faria R.N., Davies B.E., Brown D.N., Harris I.R. Microstructural and magnetic studies of cast and annealed Nd and PrFeCoBZr alloys and HDDR materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, vol. 296, pp. 223–228.
29. Morgunov R.B., Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. The thermal stability of rare-earth magnets supported by means of the magnetocaloric effect. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
30. Buzenkov A.V., Valeev R.A., Piskorsky V.P., Morgunov R.B. The effect of the content of yttrium on the properties of the sintered Magnets Nd–Dy–Y–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117.
31. Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V., Stolyankov Yu.V., Morgunov R.B. Technologies of magneto-optical information recording in thin films of rare-earth magnetically soft alloys. Part II. Ultrafast all optical switching of magnetization. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 26, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-10-21.

**Информация об авторах**

**Бузенков Александр Владимирович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Бурканов Максим Владимирович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Валеев Руслан Анверович**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Пискорский Вадим Петрович**, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Alexander V. Buzenkov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Maxim V. Burkanov**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ruslan A. Valeev**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Vadim P. Piskorsky**, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 14.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.04.2024.

The article was submitted 14.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 15.04.2024.