

Научная статья

УДК 621.313.84:62-752.4

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-58-66

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ КОБАЛЬТА КАК СПОСОБ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МАГНИТОВ

Р.А. Валеев<sup>1</sup>, В.П. Пискорский<sup>1</sup>, Д.В. Королев<sup>1</sup>, Р.Б. Моргунов<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.** Приведены экспериментальные данные об использовании редкоземельных металлов в сочетании с кобальтом в качестве основы постоянных магнитов. Анализ данных и расчеты эксплуатационных свойств таких магнитов показывают, что магниты будут обладать заметно более высокой стабильностью и демонстрировать необычно малые отклонения свойств при вариациях температуры. Предложенные магниты существенно увеличат отношение сигнал/шум при использовании в электродинамических устройствах измерения.

**Ключевые слова:** постоянные магниты, коэрцитивная сила, остаточная индукция, температурная стабильность, редкоземельные магниты

**Для цитирования:** Валеев Р.А., Пискорский В.П., Королев Д.В., Моргунов Р.Б. Оптимизация содержания кобальта как способ температурной стабилизации редкоземельных магнитов // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-58-66.

Scientific article

## OPTIMIZATION OF THE COBALT CONTENT AS A WAY OF TEMPERATURE STABILIZATION OF RARE EARTH MAGNETS

R.A. Valeev<sup>1</sup>, V.P. Piskorsky<sup>1</sup>, D.V. Korolev<sup>1</sup>, R.B. Morgunov<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.** Experimental data on the use of rare earth metals in combination with cobalt as the basis of permanent magnets are presented. Data analysis and calculations of the functionality of such magnets show that such magnets will have noticeably higher stability and will demonstrate unusually small deviations of properties under temperature variations. The proposed magnets will significantly increase the signal-to-noise ratio when removing the signal from the electrodynamic devices.

**Keywords:** permanent magnets, coercive force, residual induction, temperature stability, rare earth magnets

**For citation:** Valeev R.A., Piskorsky V.P., Korolev D.V., Morgunov R.B. Optimization of the cobalt content as a way of temperature stabilization of rare earth magnets. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-58-66.

### Введение

Индустрия постоянных магнитов развивается в направлении совершенствования не только магнитных свойств, но и других различных параметров, обеспечивающих практическую применимость этих магнитов, возможность их использования в качестве компонентов электродинамических приборов в конкретных условиях. В частности, особые требования предъявляются к механическим свойствам магнитов, их прочности,

пластичности, способности противостоять механическим нагрузкам. Важную роль при изготовлении магнитов имеет их химический состав, который должен допускать их восстановление (recycling), потому что миллионы тонн дорогих редкоземельных металлов, расходуемых на производство магнитов, должны быть использованы вновь после старения магнитов и потери эксплуатационных свойств [1–3].

При эксплуатации постоянных магнитов на первый план выступает зависимость их свойств от перепадов температуры [4–6]. Например, коэффициенты линейного теплового расширения могут не обеспечивать сохранность магнита при вариациях температуры. Кроме того, даже рекордные магнитные свойства (высокая остаточная намагниченность и коэрцитивная сила) еще не означают, что магнит пригоден для любых условий эксплуатации. Требуется достаточно низкий температурный коэффициент индукции, чтобы при вариациях температуры магнитный момент магнита не изменялся. Достижение этого условия является непростой задачей и часто требуется жертвовать основными техническими характеристиками магнита в пользу его температурной стабильности [7, 8]. От температуры зависят обменные взаимодействия внутри подрешеток и между ними, константы магнитной анизотропии. Даже анизотропия формы, зависящая от температурно-зависимой намагниченности насыщения, зависит от температуры. Все эти параметры магнита могут изменяться разнонаправлено. Если учесть, что реальный фазовый состав магнита не сводится к основной тетрагональной фазе 2-14-1, становится понятна сложность задачи по достижению температурной стабилизации свойств магнита в предварительно заданной рабочей точке.

Все эти требования приводят к тому, что сравнительно простые трехкомпонентные магниты NdFeB стремительно вытесняются аналогичными по структуре, но более сложными магнитами, такими как PrDy–FeCo–B. С одной стороны, это расширяет возможности тонкой регулировки обменных взаимодействий и объемной анизотропии сплава путем прецизионного подбора химического состава магнита. С другой стороны, например, изменение концентрации одного из элементов (например, Co) влечет за собой изменение концентраций других элементов в сплаве, причем таким образом, что меняются одновременно все концентрации. Кроме того, расширенный химический состав магнита ведет также к более вариативному фазообразованию, так что появляются фазы, которых не существует в более простых магнитах NdFeB [9–13]. Конкуренция температурных зависимостей намагниченности различных фаз в редкоземельном магните – это еще один фактор неопределенности при конструировании магнита. Таким образом, вариация химического состава магнита не является простым и однозначным методом регулирования его свойств, а требует глубокой всесторонней интерпретации и исследования влияния этих факторов на формирование магнитных свойств.

Цель данной работы – установление диапазонов варьирования концентрации Co в системе PrDy–FeCo–B, которые могли бы привести к понижению температурного коэффициента индукции, к стабилизации магнитных свойств сплава в как можно более широком диапазоне температур около рабочей точки.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 11.1. «Термостабильные магнитотвердые материалы и математические модели расчета их температурных характеристик для навигационных приборов нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [14].

### Материалы и методы

Слитки для магнитов выплавляли в вакууме с использованием индукционной печи ВИАМ-2002. Расплав состоял из железа АРМКО первого типа (ТС0018789-176–2009), диспрозия марки ДиМ-1 (ГОСТ 23862.13–79), кобальта марки К0 (ГОСТ 123–2008) и

празеоидима марки ПрМ-1 (ТУ 48-4-215-72). Бор вводили в расплав в виде лигатуры FeB. В плавильном тигле создавали рабочий слой из керамики оксида циркония, не подверженной окислению и стабилизированной оксидом иттрия. Магниты изготавливали по порошковой технологии, описанной в работах [15–17]. Дробление слитка проводили в конусной инерционной машине дробления ВКМД 10 в инертной атмосфере. Средний размер частиц сплава составлял 630 мкм. Тонкий помол проводили в центробежной планетарной мельнице в среде хладагента. Далее осуществляли прессование в ручной пресс-форме с приложением магнитного поля 800 кА/м перпендикулярно усилию прессования. Полученный магнит спекали в электровакуумной печи сопротивления при температурах 1100–1140 °С в течение 1 ч. Определение локального химического состава образцов проведено в соответствии с СТО 1-595-17-488-2015 и ГОСТ 22309-2015. С этой целью проведен рентгеноспектральный микроанализ на растровом электронном микроскопе с применением калибровки по сертифицированным эталонам. Диапазон регистрируемых элементов для качественного анализа от Be (атомный номер  $Z = 4$ ) до U ( $Z = 92$ ), для количественного анализа – от Na ( $Z = 11$ ) до U ( $Z = 92$ ). Локальность проводимого анализа 1 мкм<sup>2</sup>, глубина анализа – 1 мкм. Измерения магнитных характеристик проводили на вибрационном магнитометре в диапазоне напряженности внешнего магнитного поля от –1600 до +1600 кА/м при комнатной температуре. Образцы изготавливали сферической формы, которая создавалась в специальной шлифовальной машине.

**Результаты и обсуждение**

Атомные доли различных фаз, установленные с помощью РСМА, представлены в табл. 1. Увеличение содержания кобальта в шихте вызывает изменение фазового состава сплава. Когда содержание кобальта становится 0,24 атомн. доли, появляется фаза RF<sub>4</sub>B, имеющая состав (Pr<sub>0,41</sub>Dy<sub>0,59</sub>)(Fe<sub>0,54</sub>Co<sub>0,46</sub>)<sub>4</sub>B. Кроме того, состав основной тетрагональной магнитной фазы (Pr, Dy)<sub>2</sub>(Fe, Co)<sub>14</sub>B (фаза А) различается в центре зерна и у его границы. У границы, как правило, содержание диспрозия в этой фазе меньше, чем в центре зерна, а содержание кобальта не меняется (табл. 1).

Таблица 1

**Результаты рентгеноспектрального микроанализа для основных фаз в спеченных материалах (Pr<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)-(Fe<sub>1-y</sub>Co<sub>y</sub>)-B**

Состав магнита, атомн. долей	Фаза	Состав фазы, атомн. долей	R/F
(Pr <sub>0,82</sub> Dy <sub>0,18</sub> ) <sub>12,1</sub> (Fe <sub>0,85</sub> Co <sub>0,15</sub> ) <sub>oct</sub> B <sub>8,1</sub>	A	(Pr <sub>0,80</sub> Dy <sub>0,20</sub> ) <sub>2</sub> (Fe <sub>0,88</sub> Co <sub>0,12</sub> ) <sub>14</sub> B	0,39
	R <sub>3</sub> FB <sub>7</sub>	(Pr <sub>0,94</sub> Dy <sub>0,06</sub> ) <sub>3</sub> (Fe <sub>0,81</sub> Co <sub>0,19</sub> ) <sub>14</sub> B <sub>7</sub>	12,11
	R <sub>3</sub> F	Pr <sub>3</sub> (Fe <sub>0,18</sub> Co <sub>0,82</sub> )	5,65
(Pr <sub>0,53</sub> Dy <sub>0,47</sub> ) <sub>13,4</sub> (Fe <sub>0,80</sub> Co <sub>0,20</sub> ) <sub>oct</sub> B <sub>8,0</sub>	A (и)	(Pr <sub>0,38</sub> Dy <sub>0,62</sub> ) <sub>2</sub> (Fe <sub>0,83</sub> Co <sub>0,17</sub> ) <sub>14</sub> B	0,41
	A (к)	(Pr <sub>0,61</sub> Dy <sub>0,39</sub> ) <sub>2</sub> (Fe <sub>0,81</sub> Co <sub>0,19</sub> ) <sub>14</sub> B	0,45
	RF <sub>2</sub>	(Pr <sub>0,71</sub> Dy <sub>0,29</sub> )(Fe <sub>0,49</sub> Co <sub>0,51</sub> ) <sub>2</sub>	1,28
	R <sub>3</sub> F	Pr <sub>3</sub> (Fe <sub>0,20</sub> Co <sub>0,80</sub> )	5,11
	RF <sub>3</sub>	(Pr <sub>0,58</sub> Dy <sub>0,42</sub> )(Fe <sub>0,82</sub> Co <sub>0,18</sub> ) <sub>3</sub>	0,96
(Pr <sub>0,55</sub> Dy <sub>0,45</sub> ) <sub>12,8</sub> (Fe <sub>0,79</sub> Co <sub>0,21</sub> ) <sub>oct</sub> B <sub>14,9</sub>	A	(Pr <sub>0,50</sub> Dy <sub>0,50</sub> ) <sub>2</sub> (Fe <sub>0,81</sub> Co <sub>0,19</sub> ) <sub>14</sub> B	0,401
	RF <sub>3</sub>	(Pr <sub>0,34</sub> Dy <sub>0,66</sub> )(Fe <sub>0,85</sub> Co <sub>0,15</sub> ) <sub>3</sub>	0,698
	RF <sub>2</sub>	(Pr <sub>0,88</sub> Dy <sub>0,12</sub> )(Fe <sub>0,45</sub> Co <sub>0,55</sub> ) <sub>2</sub>	1,432
	R <sub>3</sub> F	Pr <sub>3</sub> (Fe <sub>0,17</sub> Co <sub>0,83</sub> )	5,33
(Pr <sub>0,53</sub> Dy <sub>0,47</sub> ) <sub>12,0</sub> (Fe <sub>0,77</sub> Co <sub>0,23</sub> ) <sub>oct</sub> B <sub>7,9</sub>	A	(Pr <sub>0,48</sub> Dy <sub>0,52</sub> ) <sub>2</sub> (Fe <sub>0,79</sub> Co <sub>0,21</sub> ) <sub>14</sub> B	0,397
	RF <sub>3</sub>	(Pr <sub>0,75</sub> Dy <sub>0,25</sub> )(Fe <sub>0,68</sub> Co <sub>0,32</sub> ) <sub>3</sub>	0,663
	R <sub>3</sub> F	(Pr <sub>0,70</sub> Dy <sub>0,30</sub> ) <sub>3</sub> (Fe <sub>0,64</sub> Co <sub>0,36</sub> )	5,09
	R <sub>4</sub> F <sub>3</sub>	(Pr <sub>0,98</sub> Dy <sub>0,02</sub> ) <sub>4</sub> (Fe <sub>0,39</sub> Co <sub>0,61</sub> ) <sub>3</sub>	3,57
(Pr <sub>0,65</sub> Dy <sub>0,35</sub> ) <sub>13,1</sub> (Fe <sub>0,76</sub> Co <sub>0,24</sub> ) <sub>oct</sub> B <sub>8,0</sub>	A (и)	(Pr <sub>0,52</sub> Dy <sub>0,48</sub> ) <sub>2</sub> (Fe <sub>0,78</sub> Co <sub>0,22</sub> ) <sub>14</sub> B	0,40
	A (к)	(Pr <sub>0,57</sub> Dy <sub>0,43</sub> ) <sub>2</sub> (Fe <sub>0,78</sub> Co <sub>0,22</sub> ) <sub>14</sub> B	0,41
	RF <sub>2</sub> B <sub>2</sub>	(Pr <sub>0,90</sub> Dy <sub>0,10</sub> )(Fe <sub>0,43</sub> Co <sub>0,57</sub> ) <sub>2</sub> B <sub>2</sub>	1,32
	R <sub>3</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	Pr <sub>5</sub> (Fe <sub>0,09</sub> Co <sub>0,91</sub> ) <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	6,17

Состав магнита, атомн. долей	Фаза	Состав фазы, атомн. долей	R/F
$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,2}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{10,5}$	A (II)	$(Pr_{0,45}Dy_{0,55})_2(Fe_{0,78}Co_{0,22})_{14}B$	0,40
	A (K)	$(Pr_{0,47}Dy_{0,53})_2(Fe_{0,78}Co_{0,22})_{14}B$	0,42
	RF <sub>4</sub> B	$(Pr_{0,41}Dy_{0,59})(Fe_{0,54}Co_{0,46})_4B$	0,71
	RF <sub>2</sub>	$(Pr_{0,74}Dy_{0,26})(Fe_{0,44}Co_{0,56})_2$	1,70
	R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	$(Pr_{0,99}Dy_{0,01})_5(Fe_{0,12}Co_{0,88})_2B_6$	5,6
$(Pr_{0,42}Dy_{0,58})_{13,2}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,9}$	A (II)	$(Pr_{0,31}Dy_{0,69})_2(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{14}B$	0,42
	A (K)	$(Pr_{0,35}Dy_{0,65})_2(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{14}B$	0,43
	RF <sub>2</sub> B <sub>2</sub>	$(Pr_{0,73}Dy_{0,27})(Fe_{0,48}Co_{0,52})_2B_2$	1,31
	R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	$(Pr_{0,99}Dy_{0,01})_5(Fe_{0,17}Co_{0,83})_2B_6$	5,3
$(Pr_{0,27}Dy_{0,73})_{14,4}(Fe_{0,74}Co_{0,26})_{ост}B_{6,9}$	A	$(Pr_{0,43}Dy_{0,57})_2(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{14}B$	0,380
	RF <sub>2</sub>	$(Pr_{0,80}Dy_{0,20})(Fe_{0,46}Co_{0,54})_2$	1,18
	R <sub>3</sub> F	$(Pr_{0,76}Dy_{0,24})_3(Fe_{0,46}Co_{0,54})$	16,08
	R <sub>3</sub> F	$(Pr_{0,48}Dy_{0,52})_3(Fe_{0,79}Co_{0,21})$	9,76
	R <sub>3</sub> F	$Pr_3(Fe_{0,29}Co_{0,71})$	4,95
	RF <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	$(Pr_{0,45}Dy_{0,55})(Fe_{0,78}Co_{0,22})_3B_2$	0,387
$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,3}(Fe_{0,73}Co_{0,27})_{ост}B_{7,9}$	A (II)	$(Pr_{0,38}Dy_{0,62})_2(Fe_{0,77}Co_{0,23})_{14}B$	0,39
	A (K)	$(Pr_{0,40}Dy_{0,60})_2(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{14}B$	0,40
	RF <sub>4</sub> B	$(Pr_{0,37}Dy_{0,63})(Fe_{0,56}Co_{0,44})_4B$	0,70
	RF <sub>2</sub> B <sub>2</sub>	$(Pr_{0,79}Dy_{0,21})(Fe_{0,45}Co_{0,55})_2B_2$	1,28
	R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	$(Pr_{0,99}Dy_{0,01})_5(Fe_{0,21}Co_{0,79})_2B_6$	4,64
$(Pr_{0,50}Dy_{0,50})_{16,8}(Fe_{0,71}Co_{0,29})_{ост}B_{5,0}$	A	$(Pr_{0,28}Dy_{0,72})_2(Fe_{0,73}Co_{0,27})_{14}B$	0,57
	RF <sub>3</sub>	$(Pr_{0,35}Dy_{0,65})(Fe_{0,56}Co_{0,44})_3$	0,95
$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,3}(Fe_{0,70}Co_{0,30})_{ост}B_{7,9}$	A (II)	$(Pr_{0,43}Dy_{0,57})_2(Fe_{0,72}Co_{0,28})_{14}B$	0,40
	A (K)	$(Pr_{0,48}Dy_{0,52})_2(Fe_{0,72}Co_{0,28})_{14}B$	0,41
	RF <sub>3</sub>	$(Pr_{0,46}Dy_{0,54})(Fe_{0,53}Co_{0,47})_3$	0,71
	RF <sub>2</sub>	$(Pr_{0,82}Dy_{0,18})(Fe_{0,41}Co_{0,59})_2$	1,36
	R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	$(Pr_{0,99}Dy_{0,01})_5(Fe_{0,19}Co_{0,81})_2B_6$	5,23
$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,5}(Fe_{0,66}Co_{0,34})_{ост}Al_{0,12}B_{7,9}$	A (II)	$(Pr_{0,43}Dy_{0,57})_2(Fe_{0,70}Co_{0,30})_{14}B$	0,41
	A (K)	$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_2(Fe_{0,70}Co_{0,30})_{14}B$	0,41
	RF <sub>3</sub>	$(Pr_{0,39}Dy_{0,61})(Fe_{0,53}Co_{0,47})_3$	0,72
	RF <sub>2</sub>	$(Pr_{0,85}Dy_{0,15})(Fe_{0,41}Co_{0,59})_2$	1,35
	R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	$Pr_5(Fe_{0,14}Co_{0,86})_2B_6$	5,35
$(Pr_{0,52}Dy_{0,48})_{14,1}(Fe_{0,62}Co_{0,38})_{ост}B_{6,8}$	A (II)	$(Pr_{0,44}Dy_{0,56})_2(Fe_{0,64}Co_{0,36})_{14}B$	0,38
	A (K)	$(Pr_{0,51}Dy_{0,49})_2(Fe_{0,64}Co_{0,36})_{14}B$	0,39
	RF <sub>4</sub> B	$(Pr_{0,42}Dy_{0,58})(Fe_{0,47}Co_{0,53})_4B$	0,66
	RF <sub>3</sub>	$(Pr_{0,78}Dy_{0,22})(Fe_{0,40}Co_{0,48}B_{0,12})_3$	1,10
	(R, F)O	$(Pr_{0,60}Dy_{0,33}Fe_{0,05}Co_{0,02})O$	39,1
$(Pr_{0,52}Dy_{0,48})_{14,2}(Fe_{0,59}Co_{0,41})_{ост}B_{6,7}$	A (II)	$(Pr_{0,44}Dy_{0,56})_2(Fe_{0,62}Co_{0,38})_{14}B$	0,38
	A (K)	$(Pr_{0,50}Dy_{0,50})_2(Fe_{0,62}Co_{0,38})_{14}B$	0,39
	RF <sub>4</sub> B	$(Pr_{0,41}Dy_{0,59})(Fe_{0,44}Co_{0,56})_4B$	0,65
	RF <sub>2</sub> B <sub>2</sub>	$(Pr_{0,82}Dy_{0,18})(Fe_{0,38}Co_{0,62})_2B_2$	1,26
	(R, F)O	$(Pr_{0,56}Dy_{0,34}Fe_{0,07}Co_{0,03})O$	23,8
$(Pr_{0,49}Dy_{0,51})_{14,4}(Fe_{0,56}Co_{0,44})_{ост}B_{6,5}$	A (II)	$(Pr_{0,42}Dy_{0,58})_2(Fe_{0,59}Co_{0,41})_{14}B$	0,39
	A (K)	$(Pr_{0,43}Dy_{0,57})_2(Fe_{0,59}Co_{0,41})_{14}B$	0,38
	RF <sub>4</sub> B	$(Pr_{0,37}Dy_{0,63})(Fe_{0,41}Co_{0,59})_4B$	0,66
	RF <sub>3</sub>	$(Pr_{0,65}Dy_{0,35})(Fe_{0,41}Co_{0,59})_3$	0,85
	(R, F)O	$(Pr_{0,38}Dy_{0,56}Fe_{0,04}Co_{0,02})O$	–
$(Pr_{0,56}Dy_{0,44})_{14,4}(Fe_{0,50}Co_{0,50})_{ост}B_{6,4}$	A (II)	$(Pr_{0,60}Dy_{0,40})_2(Fe_{0,53}Co_{0,47})_{14}B$	0,36
	A (K)	$(Pr_{0,48}Dy_{0,52})_2(Fe_{0,54}Co_{0,46})_{14}B$	0,38
	RF <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	$(Pr_{0,45}Dy_{0,55})(Fe_{0,34}Co_{0,66})_3B_2$	0,65
	RF <sub>2</sub> B <sub>2</sub>	$(Pr_{0,73}Dy_{0,27})(Fe_{0,37}Co_{0,63})_2B_2$	1,21
	(R, F)O	$(Pr_{0,67}Dy_{0,27}Co_{0,05})O$	–

Обозначения: A (II), A (K) – состав основной тетрагональной магнитной фазы R<sub>2</sub>(Fe, Co)<sub>14</sub>B в центре зерна и у границы соответственно; R: Pr + Dy; F: Fe + Co. R/F – отношение суммы редкоземельных металлов к содержанию железа и кобальта, в % (по массе).

Фазовый состав сплава при увеличении атомной доли кобальта становится более разнообразным. Кривые размагничивания, полученные при температуре 20 °С, приведены на рис. 1. Основные результаты измерений представлены в табл. 2. Как видно из данных табл. 2, наибольший коэффициент прямоугольности у материала  $(Pr_{0,65}Dy_{0,35})_{13,08}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{8,0}$ . Если сравнить материалы, представленные в табл. 1, то можно видеть, что у этого материала отсутствует фаза  $RF_4B$ . Наименьший фактор прямоугольности ( $SF = 0,23$ ) у материала  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,2}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{10,5}$ , и, как видно из данных табл. 1, именно в этом материале присутствует фаза  $(Pr_{0,41}Dy_{0,59})(Fe_{0,54}Co_{0,46})_4B$  (фаза 1-4-1).

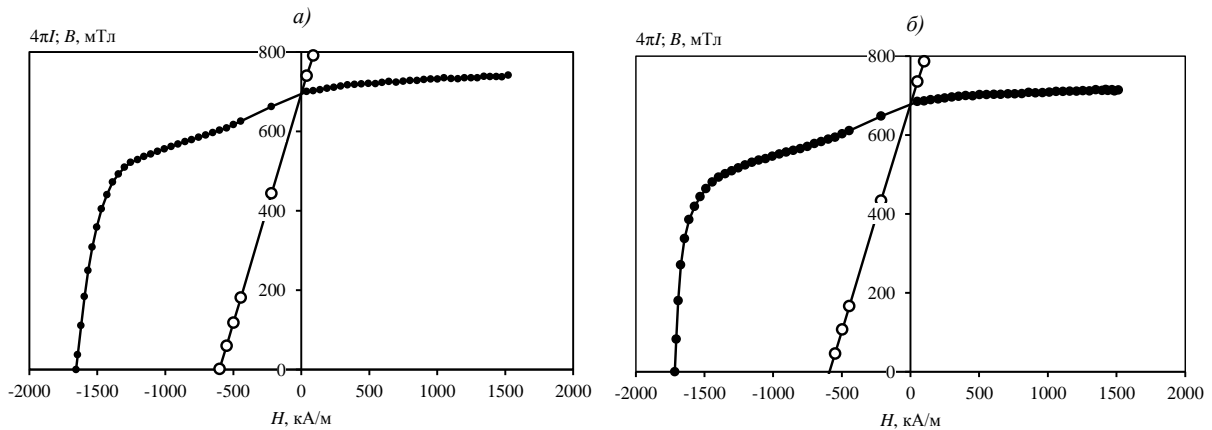


Рис. 1. Кривые размагничивания по намагнитченности  $4\pi I$  (○) и по индукции  $B$  (●) спеченных материалов составов  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,33}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{8,95}$  (а) и  $(Pr_{0,50}Dy_{0,50})_{13,1}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,92}$  (б)

Таблица 2

Состав и условия получения (спекание в течение 1 ч) измеряемых образцов

Номер состава	Состав образца, атомн. долей	$T_{сп}$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$H_{cl}$ , кА/м	$H_{св}$ , кА/м	$B_r$ , мТл	$4\pi I_s$ , мТл	$H_k$ , кА/м	SF
1	$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,33}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{9,0}$	1100	7670	1656	601	740	741	444	0,27
2	$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,26}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{9,7}$	1100	7670	1676	576	738	716	420	0,25
3	$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,2}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{10,5}$	1100	7680	1717	502	695	690	395	0,23
4	$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,37}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{ост}B_{8,0}$	1140	7680	1543	640	754	791	433	0,28
5	$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,28}(Fe_{0,77}Co_{0,23})_{ост}B_{7,9}$	1120	7720	1497	597	755	763	440	0,29
6	$(Pr_{0,65}Dy_{0,35})_{13,08}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{8,0}$	1130	7680	1115	606	788	822	456	0,41
7	$(Pr_{0,60}Dy_{0,40})_{13,17}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,9}$	1130	7760	1319	615	787	799	468	0,25
8	$(Pr_{0,55}Dy_{0,45})_{13,12}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,9}$	1130	7690	1561	642	769	761	436	0,28
9	$(Pr_{0,50}Dy_{0,50})_{13,1}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,9}$	1130	7800	1716	597	736	715	445	0,26

Обозначения:  $T_{сп}$  – температура спекания;  $H_{cl}$  – коэрцитивная сила по намагнитченности;  $H_{св}$  – коэрцитивная сила по индукции;  $SF = H_k/H_{cl}$  – коэффициент прямоугольности;  $H_k$  – поле, при котором намагнитченность составляет 90 % от  $B_r$  (поле «колена»);  $4\pi I_s$  – намагнитченность насыщения при комнатной температуре;  $B_r$  – остаточная индукция,  $\rho$  – плотность после спекания.

В работе [18] показано, что с увеличением содержания кобальта петля гистерезиса становится более полой, однако объяснений этому не предложено. По-видимому, фаза  $RF_4B$  ответственна за уменьшение прямоугольности кривой размагничивания. Соединения 1-4-1 имеют, как правило, анизотропию «легкая плоскость» [19, 20], что, по-видимому, является причиной уменьшения прямоугольности кривой размагничивания. Кроме того, эти соединения имеют так называемую точку компенсации (в этой точке намагнитченность равна нулю) в области температуры 300 К, что также ухудшает прямоугольность кривой размагничивания [21]. Из данных табл. 1 видно, что в материалах присутствует также соединение  $R_5F_2B_6$ , но оно, по-видимому, является парамагнитным и поэтому на прямоугольность петли не влияет [22]. Данное соединение имеет ромбоэдрическую

элементарную ячейку и пространственную группу  $R\bar{3}m$ . Это соединение существует для всех R как с кобальтом, так и с железом [22]. Как видно из данных табл. 2, с увеличением содержания бора (строки 1–3) величина коэрцитивной силы  $H_{cl}$  увеличивается, а значения  $H_{cb}$ ,  $B_r$  и  $H_k$  уменьшаются. Уменьшается также прямоугольность кривой размагничивания. Температурные зависимости намагниченности образцов представлены на рис. 2.

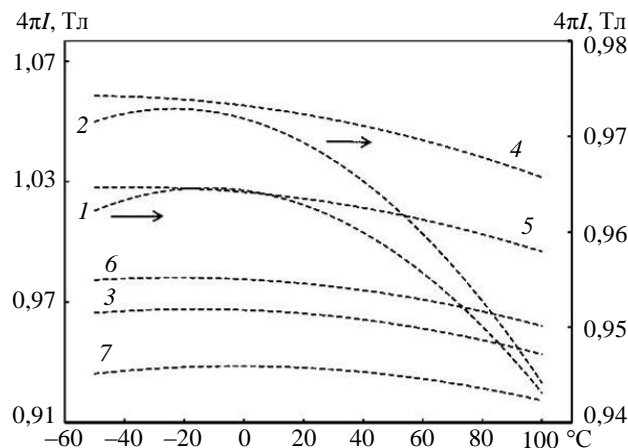


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности ( $I$ ), измеренные в нулевом магнитном поле, для спеченных материалов составов:

- 1 –  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,33}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{9,0}$ ; 2 –  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,37}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{ост}B_{8,0}$ ;  
 3 –  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,28}(Fe_{0,77}Co_{0,23})_{ост}B_{7,9}$ ; 4 –  $(Pr_{0,65}Dy_{0,35})_{13,08}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{8,0}$ ;  
 5 –  $(Pr_{0,60}Dy_{0,40})_{13,17}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,5}$ ; 6 –  $(Pr_{0,55}Dy_{0,45})_{13,12}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,9}$ ;  
 7 –  $(Pr_{0,50}Dy_{0,50})_{13,1}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,9}$

Величины температурного коэффициента индукции в областях температур  $+80 \div -50$  и  $+150 \div -50$  °C представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Величина температурного коэффициента индукции (ТКИ) спеченных магнитов**

Номер состава	Состав материала, атомн. долей	Значения ТКИ (%/°C) в диапазоне температур, °C	
		+150÷-50	+80÷-50
1	$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,33}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{9,0}$	-0,0232	-0,0103
2	$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,37}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{ост}B_{8,0}$	-0,0295	-0,0153
3	$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,28}(Fe_{0,77}Co_{0,23})_{ост}B_{7,9}$	-0,0247	-0,0115
4	$(Pr_{0,65}Dy_{0,35})_{13,08}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{8,0}$	-0,0343	-0,0221
5	$(Pr_{0,60}Dy_{0,40})_{13,17}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,9}$	-0,0299	-0,0175
6	$(Pr_{0,55}Dy_{0,45})_{13,12}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,9}$	-0,0252	-0,0124
7	$(Pr_{0,50}Dy_{0,50})_{13,1}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{7,9}$	-0,0200	-0,0069

Как видно из данных табл. 1, с увеличением содержания бора (без изменения остальных составляющих материала) появляется фаза  $RF_4B$ , имеющая анизотропию «легкая плоскость». Наибольшую величину прямоугольности ( $SF = 0,41$ ) кривой размагничивания (табл. 2) имеет образец  $(Pr_{0,65}Dy_{0,35})_{13,08}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{8,0}$  (строка 6), который отличается от образца  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,33}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{ост}B_{9,0}$  (строка 1,  $SF = 0,27$ ) только меньшим содержанием диспрозия. Остальные характеристики этих образцов за исключением величины  $H_{cl}$  практически совпадают. Маловероятно, что это связано с температурой спекания, тем более, что их плотности идентичны. По-видимому, этот вопрос требует дальнейшего исследования. Если сравнить данные, представленные на рис. 2 и в табл. 3, то можно сделать вывод, что величина температурного коэффициента индукции недостаточна для характеристики материала. Действительно, как можно

охарактеризовать этой величиной кривую 2 (рис. 2), если эта кривая демонстрирует явный максимум в области температуры  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температурный коэффициент индукции однозначно характеризует только материалы с высокой температурой Кюри – например, на основе редкоземельных металлов  $\text{RE}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_2$  либо магниты системы ЮНДК ( $\text{AlNiCo}$ ) или ХК ( $\text{CrCo}$ ) [23]. У этих материалов температурная зависимость намагниченности в области температур от  $+150$  до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  изменяется практически по линейному закону [23]. Однако эти материалы непригодны для изготовления кольцевых магнитов с радиальной текстурой.

### Заключения

Увеличение концентрации кобальта в сочетании с вариацией содержания диспрозия, имеющего большее значение поля анизотропии по сравнению с празеодимом, позволяет решить сразу две проблемы получения стабильных магнитов для электродинамических приборов:

– уменьшить температурный коэффициент индукции до значений, позволяющих электродинамическим приборам, в составе которых имеется постоянный магнит, функционировать на любых широтах в разных климатических условиях;

– увеличить значение остаточной намагниченности и, соответственно, улучшить отношение сигнал/шум при записи сигнала индукционных катушек.

Предложенная в данной статье группа материалов пригодна для изготовления температуростабильных постоянных магнитов с широким температурным диапазоном эксплуатации вблизи комнатной температуры.

### Список источников

1. Малютин Д.М. Система стабилизации полезной нагрузки на динамически настраиваемом гироскопе // Приборы и методы измерений. 2016. № 7. С. 32–34.
2. Чиркин Д.С., Рословец П.В., Татарин Ф.В., Новиков Л.З. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Вып. 1. С. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
3. Делейлэ Ф. Бортовая инерциальная система координат для европейской ракеты носителя «АРИАН-6» на основе волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. № 4. С. 3–13. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.4.003-013.
4. Подпорин С.А., Велиев Э.Б. Системы курсоказания современных шельфовых судов обеспечения // Вестник Севастопольского НТУ. Сер.: Механика, энергетика, экология. 2014. Вып. 153. С. 99–106.
5. 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. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-69-79.
6. 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.
7. Marinescu M., McGinnis K., Liu J.F., Walmer M.H. High (BH)<sub>max</sub> permanent magnets with near-zero reversible temperature coefficient of  $B_R$  // Proceedings of 20<sup>th</sup> International Workshop on Rare Earth Permanent Magnets and Their Applications (September 8–10, 2008). 2008. P. 1–6.
8. Li A., Li W., Wang H. et al. The study on thermal expansion of sintered  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  magnets // IEEE Transactions Magnetics. 2009. Vol. 45. No. 10. P. 4402–4404.
9. Tian J., Qu X., Zhang S. et al. Magnetic properties and microstructure of radially oriented  $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})$  ring magnets // Material Letters. 2007. Vol. 61. P. 5271–5274.
10. Tian J., Pan D., Zhou H. et al. Radial cracks and fracture mechanism of radially oriented ring 2:17 type  $\text{SmCo}$  magnets // Journal of Alloys and Compounds. 2009. Vol. 476. P. 98–101.
11. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 2. С. 3–10. DOI: 10.17285/0869-7035.0028.
12. Сирая Т.Н. Статистическая интерпретация вариаций Аллана как характеристики измерительных и навигационных устройств // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 1. С. 3–18.

13. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
14. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
15. Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Резчикова И.И. Влияние легирования тербием и гадолинием на термостабильность и магнитные свойства спеченных материалов Pr–Tb–Gd–Fe–Co–B // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 12.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.
16. Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бакрадзе М.М., Дворецкая Е.В., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Инженерия редкоземельных микромагнитов RE–TM–B (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.08.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
17. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Давыдова Е.А. Фазовый состав спеченных материалов системы Pr–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № S2 (39). С. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-5-10.
18. Perigo E.A., Takiishi H., Motta C.C., Faria R.N. On the squareness factor behavior of RE–FeB (RE = Nd or Pr) magnetic above room temperature // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009. Vol. 45. No. 10. P. 4431–4434.
19. Chuang Y.C., Wu C.H., Chang T.D. et al. Structure and magnetic properties of cobalt-rich Pr–Co–B alloys // *Journal of the Less-Common Metals*. 1985. Vol. 144. P. 249–256.
20. Ido H., Wallace W.E., Suzuki T. et al. Magnetic and crystallographic properties of NdCo<sub>4</sub>M (M = B, Al and Ga) // *Journal of Applied Physics*. 1990. Vol. 67. No. 9. P. 4635–4637.
21. Pedziwiatr A.T., Jiang S.Y., Wallace W.E. et al. Magnetic properties of RCo<sub>4</sub>B compounds where R = Y, Pr, Nd, Gd and Er // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1987. Vol. 66. P. 69–73.
22. Dub O.M., Chaban N.F., Kuzma Y.B. New borides of Pr<sub>5-x</sub>Co<sub>2+x</sub>B<sub>6</sub> – type structure containing iron and cobalt // *Journal of the Less-Common Metals*. 1986. Vol. 117. P. 297–302.
23. Сергеев В.В., Булыгина Т.И. Магнитотвердые материалы. М.: Энергия, 1980. 224 с.

#### Reference

1. Malyutin D.M. Payload Stabilization System on a Dynamically Adjustable Gyro. *Pribory i metody izmereniy*, 2016, no. 7, pp. 32–34.
2. Chirkin D.S., Roslovets P.V., Tatarinov F.V., Novikov L.Z. Reducing the drift of a dynamically tuned gyroscope from run to run. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, is. 1, pp. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
3. Deleile F. Onboard inertial coordinate system for the European launch vehicle "ARIAN-6" based on a wave solid-state gyroscope. *Pribory i metody izmereniy*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 3–13. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.4.003-013.
4. Podporin S.A., Veliev E.B. Heading guidance systems for modern offshore support vessels. *Bulletin of the Sevastopol NTU. Series: Mechanics, energy, ecology*, 2014, is. 153, pp. 99–106.
5. Topil'skaya S.V., Borodulin D.S., Korniyukhin A.V. Experimental evaluation of allowable mechanical impacts on a dynamically adjustable gyroscope. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Priborostroyeniye*, 2018, no. 4, pp. 69–79. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-69-79.
6. 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.
7. Marinescu M., McGinnis K., Liu J.F., Walmer M.H. High (BH)<sub>max</sub> permanent magnets with near-zero reversible temperature coefficient of B<sub>R</sub>. *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Workshop on Rare Earth Permanent Magnets and Their Applications*. 2008, pp. 1–6.
8. Li A., Li W., Wang H. et al. The study on thermal expansion of sintered Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> magnets. *IEEE Transactions Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4402–4404.
9. Tian J., Qu X., Zhang S. et al. Magnetic properties and microstructure of radially oriented Sm(Co, Fe, Cu, Zr) ring magnets. *Material Letters*, 2007, vol. 61, pp. 5271–5274.

10. Tian J., Pan D., Zhou H. et al. Radial cracks and fracture mechanism of radially oriented ring 2:17 type SmCo magnets. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 476, pp. 98–101.
11. Peshekhonov V.G. Prospects for the development of gyroscopy. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 2, pp. 3–10. DOI: 10.17285/0869-7035.0028.
12. Siraya T.N. Statistical interpretation of Allan variations as characteristics of measuring and navigation devices. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 3–18.
13. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
14. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
15. Piskorsky V.P., Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Rezhikova I.I. Terbium and gadolinium dopin g influence on thermal stability and magnetic properties of sintered magnets Pr–Tb–Gd–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 12, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.
16. Korolev D.V., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Bakradze M.M., Dvoretzkaya E.V., Koplak O.V., Morgunov R.B. Rare-earth RE–TM–B micromag-nets engineering (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 12, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
17. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Piskorskij V.P., Rezhikova I.I., Valeev R.A., Davydova E.A. Phase composition of the Pr–Dy–Fe–Co–B sintered materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. S2 (39), pp. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-5-10.
18. Perigo E.A., Takiishi H., Motta C.C., Faria R.N. On the squareness factor behavior of RE–FeB (RE = Nd or Pr) magnetic above room temperature. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4431–4434.
19. Chuang Y.C., Wu C.H., Chang T.D. et al. Structure and magnetic properties of cobalt-rich Pr–Co–B alloys. *Journal of the Less-Common Metals*, 1985, vol. 144, pp. 249–256.
20. Ido H., Wallace W.E., Suzuki T. et al. Magnetic and crystallographic properties of NdCo<sub>4</sub>M (M = B, Al and Ga). *Journal of Applied Physics*, 1990, vol. 67, no. 9, pp. 4635–4637.
21. Pedziwiatr A.T., Jiang S.Y., Wallace W.E. et al. Magnetic properties of RCo<sub>4</sub>B compounds where R = Y, Pr, Nd, Gd and Er. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, vol. 66, pp. 69–73.
22. Dub O.M., Chaban N.F., Kuzma Y.B. New borides of Pr<sub>5-x</sub>Co<sub>2+x</sub>B<sub>6</sub> – type structure containing iron and cobalt. *Journal of the Less-Common Metals*, 1986, vol. 117, pp. 297–302.
23. Sergeev V.V., Bulygina T.I. *Hard magnetic materials*. Moscow: Energy, 1980, 224 p.

## Информация об авторах

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

**Пискорский Вадим Петрович**, заместитель начальника лаборатории по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Королев Дмитрий Викторович**, старший научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Моргунов Роман Борисович**, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

## Information about the authors

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

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

**Dmitry V. Korolev**, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Roman B. Morgunov**, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 05.12.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.12.2022.

The article was submitted 05.12.2022; approved and accepted for publication after reviewing 16.12.2022.