

УДК 539.231:669.859:537.622

Е.Н. Каблов<sup>1</sup>, О.Г. Оспенникова<sup>1</sup>, В.П. Пискорский<sup>1</sup>,  
И.И. Резчикова<sup>1</sup>, Р.А. Валеев<sup>1</sup>, Е.А. Давыдова<sup>1</sup>

### ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Pr–Dy–Fe–Co–B

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-5-10

Материалы системы Pr–Dy–Fe–Co–B применяются для производства кольцевых магнитов с радиальной текстурой (КМРТ). Основными приборами для инерциальной навигации, в конструкцию которых включены магниты, являются динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) и акселерометры. Кольцевой магнит с радиальной текстурой является оптимальной конструкцией магнита для динамически настраиваемых гироскопов. Исследован фазовый состав материалов на основе системы Pr–Dy–Fe–Co–B. Для спеченных материалов  $(Pr_{1-x}Dy_x)_{12-17}(Fe_{1-y}Co_y)_{\text{ост}}B_6$  ( $x=0,08-0,73$ ;  $y=0,15-0,50$ ) средний состав фаз  $RF_4B$ ,  $RF_3B_2$  по Dy составляет:  $(Pr_{0,4}Dy_{0,6})(Fe, Co)_4B$ ,  $(Pr_{0,4}Dy_{0,6})(Fe, Co)_3B_2$ . Содержание Dy в фазе  $RF_3$  не зависит от количества Co в материале, а определяется присутствием фаз  $RF_4B$  и  $RF_3B_2$ . Содержание Dy в фазе  $RF_3$  зависит от количества Dy в материале. Содержание Dy в фазах  $RF_2$  и  $RF_2B_2$  не превышает 0,26–0,27 атомн. долей и слабо зависит от количества Dy в материале. Содержание Dy в фазе A всегда выше в центре зерна.

**Ключевые слова:** кольцевой магнит с радиальной текстурой, динамически настраиваемый гироскоп, радиальная текстура.

The materials of the Pr–Dy–Fe–Co–B system are used for production of ring magnet with radial texture. Dynamically tuned gyroscopes (DTG) and accelerometers are the major appliances for inertial navigation that include the magnets. The optimal design of the magnet for dynamically tuned gyroscopes (DTG) is a ring magnet with radial texture (RMRT). The phase composition of Pr–Dy–Fe–Co–B sintered materials is studied. The average composition of  $RF_4B$ ,  $RF_3B_2$  phases for  $(Pr_{1-x}Dy_x)_{12-17}(Fe_{1-y}Co_y)_{\text{ост}}B_6$  ( $x=0,08-0,73$ ;  $y=0,15-0,50$ ) sintered materials is:  $Pr_{0,4}Dy_{0,6}(Fe, Co)_4B$ ,  $(Pr_{0,4}Dy_{0,6})(Fe, Co)_3B_2$ . The Dy content in the  $RF_3$  phase does not depend on Co amount in the material but is determined by the presence of  $RF_4B$ ,  $RF_3B_2$  phases. The Dy content in the  $RF_3$  phase depends on Dy amount in the material. The Dy content in  $RF_2$  and  $RF_2B_2$  phases does not exceed 0,26–0,27 at. shares and weakly depends on the Dy amount in the material. The Dy content in phase A is always higher in the center of the grain.

**Keywords:** ring magnet with radial texture, dynamically tuned gyroscope, radial texture.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

### Введение

Кольцевые магниты с радиальной текстурой (КМРТ) – основная часть динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ) [1–4]. Перспективными материалами для производства таких магнитов являются материалы системы РЗМ–Fe–B, легированные тяжелыми редкоземельными металлами и кобальтом, повышающими температурную стабильность изделий. В данной статье изучен фазовый состав системы Pr–Dy–Fe–Co–B.

### Материалы и методы

Исследование локального состава фаз проводили методом качественного и количественного МРСА на аппарате Superprob-733 («JSMA-733», фирма Jeol, Япония) с применением энергодисперсионного анализатора Incaenergy (Англия). Локальность анализа составляет 1 мкм<sup>2</sup>, глубина анализа 1 мкм. Фотографии исследуемых структур получали в специальном режиме СОМРО,

изображение в котором формируется обратноотраженными электронами. Его контраст определяется средним атомным номером фазы. Чем выше средний атомный номер исследуемой области (фазы), тем светлее данный участок выглядит на фотографии. Изображение в режиме СОМРО получают на нетравленных шлифах. Это позволяет проводить на них количественный анализ, точность которого в случае нетравленного шлифа выше [5–8].

В представленной работе исследованы материалы следующих составов (в % атомн.):

- 1 –  $(Pr_{0,82}Dy_{0,18})_{12,1}(Fe_{0,85}Co_{0,15})_{\text{ост}}B_{8,1}$ ;
- 2 –  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,4}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{\text{ост}}B_{8,0}$ ;
- 3 –  $(Pr_{0,55}Dy_{0,45})_{12,8}(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{\text{ост}}B_{14,9}$ ;
- 4 –  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{12,0}(Fe_{0,77}Co_{0,23})_{\text{ост}}B_{7,9}$ ;
- 5 –  $(Pr_{0,65}Dy_{0,35})_{13,1}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{\text{ост}}B_{8,0}$ ;
- 6 –  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,2}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{\text{ост}}B_{10,5}$ ;
- 7 –  $(Pr_{0,42}Dy_{0,58})_{13,2}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{\text{ост}}B_{7,9}$ ;

- 8 –  $(Pr_{0,27}Dy_{0,73})_{14,4}(Fe_{0,74}Co_{0,26})_{ост}B_{6,9}$ ;  
 9 –  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,3}(Fe_{0,73}Co_{0,27})_{ост}B_{7,9}$ ;  
 10 –  $(Pr_{0,50}Dy_{0,50})_{16,8}(Fe_{0,71}Co_{0,29})_{ост}B_{5,0}$ ;  
 11 –  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,3}(Fe_{0,70}Co_{0,30})_{ост}B_{7,9}$ ;  
 12 –  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,5}(Fe_{0,66}Co_{0,34})_{ост}B_{7,9}$ ;  
 13 –  $(Pr_{0,52}Dy_{0,48})_{14,1}(Fe_{0,62}Co_{0,38})_{ост}B_{6,8}$ ;  
 14 –  $(Pr_{0,52}Dy_{0,48})_{14,2}(Fe_{0,59}Co_{0,41})_{ост}B_{6,7}$ ;  
 15 –  $(Pr_{0,49}Dy_{0,51})_{14,4}(Fe_{0,56}Co_{0,44})_{ост}B_{6,5}$ ;  
 16 –  $(Pr_{0,56}Dy_{0,44})_{14,4}(Fe_{0,50}Co_{0,50})_{ост}B_{6,4}$ ;  
 17 –  $(Pr_{0,92}Dy_{0,08})_{13,3}(Fe_{0,50}Co_{0,50})_{ост}B_{6,9}$ ;  
 18 –  $Pr_{14,5}(Fe_{0,13}Co_{0,87})_{ост}B_{5,5}$ .

Сплавы выплавлены в вакуумной индукционной печи по обычной методике [9–18]. Слитки дробили до размера частиц <630 мкм в инертной атмосфере. Тонкий помол проводили в центробежно-планетарной мельнице в среде трифтортрихлорэтана. Заготовки магнитов в виде призм прессовали в магнитном поле 800 кА/м методом «влажного» прессования. Спекание проводили в вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16-ИЗ при температуре 1150°C в течение 1 ч.

### Результаты

Микроструктуры магнитов представлены на рисунке. Видно, что с увеличением содержания Со изменяется фазовый состав материала. Результаты идентификации представлены в табл. 1.

### Обсуждение и заключения

Из данных табл. 1 видно, что методом МРСА межзеренная обогащенная Pr и Dy фаза не обнаружена, за исключением некоторых образцов, где эта фаза присутствует в виде оксида на стыках зерен фазы  $R_2F_{14}B$  (см. рисунок, в). Из-за недостаточной контрастности изображения размеры зерен следует считать приближенными.

По причине недостаточной контрастности изображения, некоторые близкие «по цвету» фазы (особенно с размером зерна <5 мкм) могли быть не идентифицированы методом МРСА. На отдельных образцах (при достаточной контрастности) удалось определить объемное содержание фаз (см. табл. 1).

Определенная закономерность в появлении фаз в зависимости от содержания Со присутствует. Так, для образцов с  $y < 0,26$  присутствует фаза  $R_3F$ , которая при больших содержаниях Со не обнаружена. Закономерности в составе фаз, представленных в табл. 1, видны из данных табл. 2. Видно, что фаза  $RF_4B$  содержит 0,55–0,63 атомн. долей Dy (независимо от его содержания в материале). Действительно, даже у образца состава  $(Pr_{0,92}Dy_{0,08})_{13,3}(Fe_{0,50}Co_{0,50})_{ост}B_{6,9}$  фаза  $RF_4B$  содержит 0,55 атомн. долей Dy и только когда материал вообще не содержит Dy, он отсутствует и в фазе  $RF_4B$  (см. табл. 1, образец 18). Аналогично ведет себя и фаза  $RF_3B_2$  (см. табл. 2). Таким образом, можно сделать вывод, что для спеченных материалов  $(Pr_{1-x}Dy_x)_{12-17}(Fe_{1-y}Co_y)_{ост}B_6$  ( $x=0,08-0,73$ ;

$y=0,15-0,50$ ) средний состав указанных фаз по Dy составляет:  $(Pr_{0,4}Dy_{0,6})(Fe, Co)_4B$  и  $(Pr_{0,4}Dy_{0,6})(Fe, Co)_3B_2$ . Фаза  $RF_3$ , которая присутствует в материале, практически при всех концентрациях Со имеет состав по Dy, который зависит от присутствия (или отсутствия) фаз  $RF_4B$  и  $RF_3B_2$  (см. табл. 1 и 2). Из данных табл. 2 видно, что при отсутствии этих фаз фаза  $RF_3$  содержит 0,54–0,66 атомн. долей Dy. Когда в образце присутствуют фазы  $RF_4B$  и  $RF_3B_2$ , содержание Dy в фазе  $RF_3$  уменьшается до 0,22–0,35 атомн. долей.

Отметим, что на содержание Dy в этой фазе влияет и присутствие других фаз. Так, в образце 2 фаза Лавеса  $RF_2$  содержит 0,29 атомн. долей Dy, что, вероятно, приводит к уменьшению количества Dy в фазе  $RF_3$  до 0,42 отн. атомн. долей (см. табл. 2). Кроме того, из-за недостаточного контраста либо размера зерна менее ~5 мкм некоторые фазы, например  $RF_4B$  и  $RF_3B_2$ , могут быть не идентифицированы методом МРСА. Например, в образце 16 (см. табл. 2) методом рентгенофазового анализа обнаружена фаза  $RF_4B$ , не отмеченная МРСА. Не исключено, что понижение количества Dy до 0,25 атомн. долей в образце 4 как раз и объясняется присутствием этой фазы. Таким образом, можно сделать вывод, что содержание Dy в фазе  $RF_3$  не зависит от количества Со в материале, а определяется присутствием фаз  $RF_4B$ ,  $RF_3B_2$ . Кроме того, содержание Dy в фазе  $RF_3$  зависит от количества Dy в материале. В случае низкого количества Dy в материале (образец 17, см. табл. 2), фаза  $RF_3$  вообще отсутствует. При содержании Dy в материале ~0,5 атомн. долей средний состав фазы  $(Pr_{0,46-0,34}Dy_{0,54-0,66})(Fe, Co)_3$  – когда отсутствуют фазы  $RF_4B$  и  $RF_3B_2$ ,  $(Pr_{0,78-0,65}Dy_{0,22-0,35})(Fe, Co)_3$  – когда они присутствуют. Содержание Dy в фазах  $RF_2$  и  $RF_2B_2$  не превышает 0,26–0,27 атомн. долей и до определенного предела слабо зависит от количества Dy в материале. Так, при  $x=0,73$  содержание Dy в  $RF_2$  составляет 0,2 атомн. долей (образец 8, см. табл. 2), а при  $x=0,47$  содержание Dy в  $RF_2$  составляет 0,26 атомн. долей (образец 6, см. табл. 2). Аналогичная ситуация с фазой  $RF_2B_2$ . При  $x=0,35$  количество Dy в этой фазе 0,1 атомн. долей (образец 5, см. табл. 2), а при  $x=0,58$  количество Dy 0,27 атомн. долей (образец 7, см. табл. 2). При этом количество Dy в фазах не зависит от присутствия фаз  $RF_4B$  и  $RF_3B_2$  (см. табл. 2). Уменьшение содержания Dy в материале приводит к резкому уменьшению его количества в фазе  $RF_2B_2$  (образец 17, см. табл. 2). Фаза  $RF_2$ , когда  $y > 0,34$ , не обнаружена. Таким образом, в области  $x=0,35-0,73$ ;  $y=0,15-0,50$  фазы  $RF_2B_2$  и  $RF_2$  содержат 0,1–0,27 атомн. долей Dy. В материалах также обнаружены фазы  $R_5F_2B_6$  и  $R_3F$ , однако влияние этих фаз на содержание Dy не рассматривалось. За исключением образца 7, в котором содержание фазы  $R_5F_2B_6$  составляет 6,2% (объемн.), в остальных образцах ее количество не превышает

Таблица 1

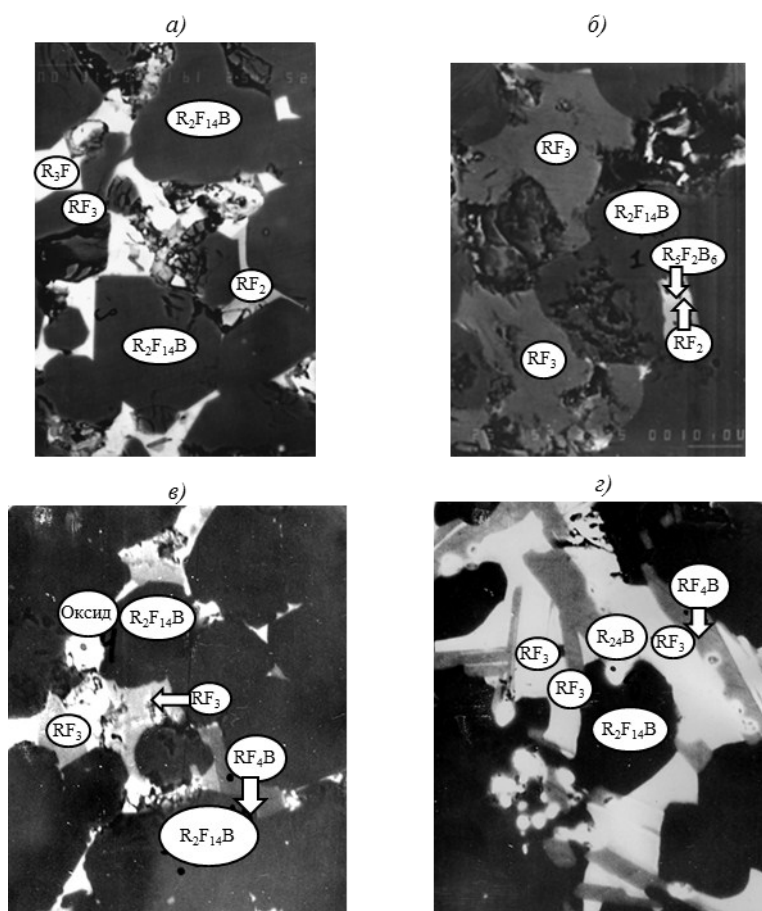
Результаты МРСА основных фаз в материалах системы (Pr<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)-(Fe<sub>1-y</sub>Co<sub>y</sub>)-B

Условный номер образца	Состав материала	Фаза	Размер зерна фазы, мкм (содержание фазы, % объемн.)	Состав фазы
1	(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>ост</sub> B <sub>8,1</sub>	A <sub>II</sub> R <sub>3</sub> FB <sub>7</sub> R <sub>3</sub> F	- До 10 5	(Pr <sub>0,80</sub> Dy <sub>0,20</sub> ) <sub>1,9</sub> (Fe <sub>0,88</sub> Co <sub>0,12</sub> ) <sub>12,9</sub> B <sub>0,9</sub> (Pr <sub>0,94</sub> Dy <sub>0,06</sub> ) <sub>3,0</sub> (Fe <sub>0,81</sub> Co <sub>0,19</sub> ) <sub>0,6</sub> B <sub>7,9</sub> Pr <sub>3,2</sub> (Fe <sub>0,18</sub> Co <sub>0,82</sub> ) <sub>1,4</sub>
2	(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>ост</sub> B <sub>8,0</sub>	A <sub>II</sub> A <sub>I</sub> RF <sub>2</sub> R <sub>3</sub> F RF <sub>3</sub>	30 - 10 10 15	(Pr <sub>0,38</sub> Dy <sub>0,62</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,83</sub> Co <sub>0,17</sub> ) <sub>13,9</sub> B <sub>0,5</sub> (Pr <sub>0,61</sub> Dy <sub>0,39</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,81</sub> Co <sub>0,19</sub> ) <sub>12,6</sub> B <sub>0,6</sub> (Pr <sub>0,71</sub> Dy <sub>0,29</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,49</sub> Co <sub>0,51</sub> ) <sub>2,0</sub> Pr <sub>2,5</sub> (Fe <sub>0,20</sub> Co <sub>0,80</sub> ) <sub>1,2</sub> (Pr <sub>0,58</sub> Dy <sub>0,42</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,82</sub> Co <sub>0,18</sub> ) <sub>2,8</sub>
3	(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>ост</sub> B <sub>14,9</sub>	A <sub>II</sub> RF <sub>3</sub> RF <sub>2</sub> R <sub>3</sub> F	- 25 10 10	(Pr <sub>0,50</sub> Dy <sub>0,50</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,81</sub> Co <sub>0,19</sub> ) <sub>14,2</sub> B <sub>1</sub> (Pr <sub>0,34</sub> Dy <sub>0,66</sub> ) <sub>0,9</sub> (Fe <sub>0,85</sub> Co <sub>0,15</sub> ) <sub>3,4</sub> (Pr <sub>0,88</sub> Dy <sub>0,12</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,45</sub> Co <sub>0,55</sub> ) <sub>1,8</sub> Pr <sub>3,0</sub> (Fe <sub>0,17</sub> Co <sub>0,83</sub> ) <sub>1,4</sub>
4	(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>ост</sub> B <sub>7,9</sub>	A <sub>II</sub> RF <sub>3</sub> R <sub>3</sub> F R <sub>4</sub> F <sub>3</sub>	- 3 3 5	(Pr <sub>0,48</sub> Dy <sub>0,52</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,79</sub> Co <sub>0,21</sub> ) <sub>13,9</sub> B <sub>1</sub> (Pr <sub>0,75</sub> Dy <sub>0,25</sub> ) <sub>0,8</sub> (Fe <sub>0,68</sub> Co <sub>0,32</sub> ) <sub>2,9</sub> (Pr <sub>0,70</sub> Dy <sub>0,30</sub> ) <sub>2,8</sub> (Fe <sub>0,64</sub> Co <sub>0,36</sub> ) <sub>1,4</sub> (Pr <sub>0,98</sub> Dy <sub>0,02</sub> ) <sub>4,1</sub> (Fe <sub>0,39</sub> Co <sub>0,61</sub> ) <sub>2,8</sub>
5	(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>ост</sub> B <sub>8,0</sub>	A <sub>II</sub> A <sub>I</sub> RF <sub>2</sub> B <sub>2</sub> R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	30 (91,0) - 10 (6,5) 3 (0,3)	(Pr <sub>0,52</sub> Dy <sub>0,48</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,78</sub> Co <sub>0,22</sub> ) <sub>13,8</sub> B <sub>0,7</sub> (Pr <sub>0,57</sub> Dy <sub>0,43</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,78</sub> Co <sub>0,22</sub> ) <sub>13,9</sub> B <sub>0,7</sub> (Pr <sub>0,90</sub> Dy <sub>0,10</sub> ) <sub>1,2</sub> (Fe <sub>0,43</sub> Co <sub>0,57</sub> ) <sub>2,3</sub> B <sub>1,5</sub> Pr <sub>5,2</sub> (Fe <sub>0,09</sub> Co <sub>0,91</sub> ) <sub>2,0</sub> B <sub>5,6</sub>
6	(Pr <sub>0,53</sub> Dy <sub>0,47</sub> ) <sub>13,2</sub> (Fe <sub>0,76</sub> Co <sub>0,24</sub> ) <sub>ост</sub> B <sub>10,5</sub>	A <sub>II</sub> A <sub>I</sub> RF <sub>4</sub> B RF <sub>2</sub> R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	20 (84,5) - 6 (8,8) До 4 (4,3) 3 (0,4)	(Pr <sub>0,45</sub> Dy <sub>0,55</sub> ) <sub>2,2</sub> (Fe <sub>0,78</sub> Co <sub>0,22</sub> ) <sub>14,4</sub> B <sub>0,8</sub> (Pr <sub>0,47</sub> Dy <sub>0,53</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,78</sub> Co <sub>0,22</sub> ) <sub>13,5</sub> B <sub>0,7</sub> (Pr <sub>0,41</sub> Dy <sub>0,59</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,54</sub> Co <sub>0,46</sub> ) <sub>3,9</sub> B <sub>0,7</sub> (Pr <sub>0,74</sub> Dy <sub>0,26</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,44</sub> Co <sub>0,56</sub> ) <sub>1,5</sub> (Pr <sub>0,99</sub> Dy <sub>0,01</sub> ) <sub>5,2</sub> (Fe <sub>0,12</sub> Co <sub>0,88</sub> ) <sub>2,2</sub> B <sub>4</sub>
7	(Pr <sub>0,42</sub> Dy <sub>0,58</sub> ) <sub>13,2</sub> (Fe <sub>0,76</sub> Co <sub>0,24</sub> ) <sub>ост</sub> B <sub>7,9</sub>	A <sub>II</sub> A <sub>I</sub> RF <sub>2</sub> B <sub>2</sub> R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	30 (90,2) - 10 (3,0) 4 (6,2)	(Pr <sub>0,31</sub> Dy <sub>0,69</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,79</sub> Co <sub>0,21</sub> ) <sub>13,7</sub> B <sub>0,8</sub> (Pr <sub>0,35</sub> Dy <sub>0,65</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,79</sub> Co <sub>0,21</sub> ) <sub>13,7</sub> B <sub>0,8</sub> (Pr <sub>0,73</sub> Dy <sub>0,27</sub> ) <sub>1,1</sub> (Fe <sub>0,48</sub> Co <sub>0,52</sub> ) <sub>2,2</sub> B <sub>1,5</sub> (Pr <sub>0,99</sub> Dy <sub>0,01</sub> ) <sub>4,9</sub> (Fe <sub>0,17</sub> Co <sub>0,83</sub> ) <sub>2,2</sub> B <sub>5</sub>
8	(Pr <sub>0,27</sub> Dy <sub>0,73</sub> ) <sub>14,4</sub> (Fe <sub>0,74</sub> Co <sub>0,26</sub> ) <sub>ост</sub> B <sub>6,9</sub>	A <sub>II</sub> RF <sub>2</sub> R <sub>3</sub> F R <sub>3</sub> F R <sub>3</sub> F RF <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	20 4 2 2 2 6	(Pr <sub>0,43</sub> Dy <sub>0,57</sub> ) <sub>2,0</sub> (Fe <sub>0,79</sub> Co <sub>0,21</sub> ) <sub>14,3</sub> B <sub>0,7</sub> (Pr <sub>0,80</sub> Dy <sub>0,20</sub> ) <sub>0,9</sub> (Fe <sub>0,46</sub> Co <sub>0,54</sub> ) <sub>1,9</sub> (Pr <sub>0,76</sub> Dy <sub>0,24</sub> ) <sub>2,9</sub> (Fe <sub>0,46</sub> Co <sub>0,54</sub> ) <sub>0,5</sub> (Pr <sub>0,48</sub> Dy <sub>0,52</sub> ) <sub>2,9</sub> (Fe <sub>0,79</sub> Co <sub>0,21</sub> ) <sub>0,8</sub> Pr <sub>3</sub> (Fe <sub>0,29</sub> Co <sub>0,71</sub> ) <sub>1,5</sub> (Pr <sub>0,45</sub> Dy <sub>0,55</sub> ) <sub>0,5</sub> (Fe <sub>0,78</sub> Co <sub>0,22</sub> ) <sub>3,4</sub> B <sub>1,6</sub>
9	(Pr <sub>0,53</sub> Dy <sub>0,47</sub> ) <sub>13,3</sub> (Fe <sub>0,73</sub> Co <sub>0,27</sub> ) <sub>ост</sub> B <sub>7,9</sub>	A <sub>II</sub> A <sub>I</sub> RF <sub>4</sub> B RF <sub>2</sub> B <sub>2</sub> R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	30 (88,4) - 10 (5,7) 10 (4,9) 5 (0,4)	(Pr <sub>0,38</sub> Dy <sub>0,62</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,77</sub> Co <sub>0,23</sub> ) <sub>14,7</sub> B <sub>0,8</sub> (Pr <sub>0,40</sub> Dy <sub>0,60</sub> ) <sub>2,0</sub> (Fe <sub>0,76</sub> Co <sub>0,24</sub> ) <sub>14,0</sub> B <sub>0,8</sub> (Pr <sub>0,37</sub> Dy <sub>0,63</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,56</sub> Co <sub>0,44</sub> ) <sub>3,9</sub> B <sub>1,0</sub> (Pr <sub>0,79</sub> Dy <sub>0,21</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,45</sub> Co <sub>0,55</sub> ) <sub>2,0</sub> B <sub>1,5</sub> (Pr <sub>0,99</sub> Dy <sub>0,01</sub> ) <sub>4,3</sub> (Fe <sub>0,21</sub> Co <sub>0,79</sub> ) <sub>2,3</sub> B <sub>6,4</sub>
10	(Pr <sub>0,50</sub> Dy <sub>0,50</sub> ) <sub>16,8</sub> (Fe <sub>0,71</sub> Co <sub>0,29</sub> ) <sub>ост</sub> B <sub>5,0</sub>	A <sub>II</sub> RF <sub>3</sub>	20 (78) 15 (13)	(Pr <sub>0,28</sub> Dy <sub>0,72</sub> ) <sub>2,5</sub> (Fe <sub>0,73</sub> Co <sub>0,27</sub> ) <sub>11,9</sub> B <sub>0,7</sub> (Pr <sub>0,35</sub> Dy <sub>0,65</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,56</sub> Co <sub>0,44</sub> ) <sub>2,9</sub>
11	(Pr <sub>0,53</sub> Dy <sub>0,47</sub> ) <sub>13,3</sub> (Fe <sub>0,70</sub> Co <sub>0,30</sub> ) <sub>ост</sub> B <sub>7,9</sub>	A <sub>II</sub> A <sub>I</sub> RF <sub>3</sub> RF <sub>2</sub> R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	20 (89,0) - 20 (6,2) 7 (3,8) 2 (0,3)	(Pr <sub>0,43</sub> Dy <sub>0,57</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,72</sub> Co <sub>0,28</sub> ) <sub>13,9</sub> B <sub>0,8</sub> (Pr <sub>0,48</sub> Dy <sub>0,52</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,72</sub> Co <sub>0,28</sub> ) <sub>13,7</sub> B <sub>0,7</sub> (Pr <sub>0,46</sub> Dy <sub>0,54</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,53</sub> Co <sub>0,47</sub> ) <sub>3,6</sub> (Pr <sub>0,82</sub> Dy <sub>0,18</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,41</sub> Co <sub>0,59</sub> ) <sub>1,9</sub> (Pr <sub>0,99</sub> Dy <sub>0,01</sub> ) <sub>5,6</sub> (Fe <sub>0,19</sub> Co <sub>0,81</sub> ) <sub>2,6</sub> B <sub>4</sub>
12	(Pr <sub>0,53</sub> Dy <sub>0,47</sub> ) <sub>13,5</sub> (Fe <sub>0,66</sub> Co <sub>0,34</sub> ) <sub>ост</sub> B <sub>7,9</sub>	A <sub>II</sub> A <sub>I</sub> RF <sub>3</sub> RF <sub>2</sub> R <sub>5</sub> F <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	40 (77,6) - 20 (18,2) 6 (2,6) 2 (0,1)	(Pr <sub>0,43</sub> Dy <sub>0,57</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,70</sub> Co <sub>0,30</sub> ) <sub>13,8</sub> B <sub>0,7</sub> (Pr <sub>0,53</sub> Dy <sub>0,47</sub> ) <sub>2,1</sub> (Fe <sub>0,70</sub> Co <sub>0,30</sub> ) <sub>13,9</sub> B <sub>0,8</sub> (Pr <sub>0,39</sub> Dy <sub>0,61</sub> ) <sub>0,9</sub> (Fe <sub>0,53</sub> Co <sub>0,47</sub> ) <sub>3,4</sub> (Pr <sub>0,85</sub> Dy <sub>0,15</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,41</sub> Co <sub>0,59</sub> ) <sub>1,8</sub> Pr <sub>5,5</sub> (Fe <sub>0,14</sub> Co <sub>0,86</sub> ) <sub>2,5</sub> B <sub>4,5</sub>
13	(Pr <sub>0,52</sub> Dy <sub>0,48</sub> ) <sub>14,1</sub> (Fe <sub>0,62</sub> Co <sub>0,38</sub> ) <sub>ост</sub> B <sub>6,8</sub>	A <sub>II</sub> A <sub>I</sub> RF <sub>4</sub> B RF <sub>3</sub> (R, F)O	30 (80,5) - 17 (11,5) 8 (5,5) 5 (0,9)	(Pr <sub>0,44</sub> Dy <sub>0,56</sub> ) <sub>1,9</sub> (Fe <sub>0,64</sub> Co <sub>0,36</sub> ) <sub>13,7</sub> B <sub>1,2</sub> (Pr <sub>0,51</sub> Dy <sub>0,49</sub> ) <sub>1,9</sub> (Fe <sub>0,64</sub> Co <sub>0,36</sub> ) <sub>13,3</sub> B <sub>1,2</sub> (Pr <sub>0,42</sub> Dy <sub>0,58</sub> ) <sub>0,9</sub> (Fe <sub>0,47</sub> Co <sub>0,53</sub> ) <sub>3,8</sub> B <sub>1,3</sub> (Pr <sub>0,78</sub> Dy <sub>0,22</sub> ) <sub>1,0</sub> (Fe <sub>0,40</sub> Co <sub>0,60</sub> ) <sub>2,6</sub> B <sub>1,2</sub> (Pr <sub>0,60</sub> Dy <sub>0,40</sub> ) <sub>0,9</sub> (Fe <sub>0,05</sub> Co <sub>0,95</sub> ) <sub>0,9</sub> B <sub>1,4</sub>
14	(Pr <sub>0,52</sub> Dy <sub>0,48</sub> ) <sub>14,2</sub> (Fe <sub>0,59</sub> Co <sub>0,41</sub> ) <sub>ост</sub> B <sub>6,7</sub>	A <sub>II</sub> A <sub>I</sub> RF <sub>4</sub> B RF <sub>2</sub> B <sub>2</sub> (R, F)O	30 (79,1) - До 18 (11,9) 3 (7,5) 5 (0,6)	(Pr <sub>0,44</sub> Dy <sub>0,56</sub> ) <sub>1,9</sub> (Fe <sub>0,62</sub> Co <sub>0,38</sub> ) <sub>13,3</sub> B <sub>1</sub> (Pr <sub>0,50</sub> Dy <sub>0,50</sub> ) <sub>2,0</sub> (Fe <sub>0,62</sub> Co <sub>0,38</sub> ) <sub>13,8</sub> B <sub>1</sub> (Pr <sub>0,41</sub> Dy <sub>0,59</sub> ) <sub>0,9</sub> (Fe <sub>0,44</sub> Co <sub>0,56</sub> ) <sub>3,8</sub> B <sub>1</sub> (Pr <sub>0,82</sub> Dy <sub>0,18</sub> ) <sub>1,1</sub> (Fe <sub>0,38</sub> Co <sub>0,62</sub> ) <sub>2,1</sub> B <sub>1,5</sub> (Pr <sub>0,56</sub> Dy <sub>0,44</sub> ) <sub>0,9</sub> (Fe <sub>0,07</sub> Co <sub>0,93</sub> ) <sub>0,9</sub> B <sub>1,4</sub>

Таблица 1 (продолжение)

Условный номер образца	Состав материала	Фаза	Размер зерна фазы, мкм (содержание фазы, % объемн.)	Состав фазы
15	$(Pr_{0,49}Dy_{0,51})_{14,4}(Fe_{0,56}Co_{0,44})_{oct}B_{6,5}$	$A_{ц}$ $A_r$ $RF_2B$ $RF_3$ $(R, F)O$	25 (73,7) — 25 (12,7) 25 (7,2) 5 (0,6)	$(Pr_{0,42}Dy_{0,58})_{2,0}(Fe_{0,59}Co_{0,41})_{13,7}B_1$ $(Pr_{0,43}Dy_{0,57})_{1,9}(Fe_{0,59}Co_{0,41})_{13,8}B_1$ $(Pr_{0,37}Dy_{0,63})_{1,0}(Fe_{0,41}Co_{0,59})_{3,9}B_1$ $(Pr_{0,65}Dy_{0,35})_{1,0}(Fe_{0,41}Co_{0,59})_{2,9}$ $(Pr_{0,38}Dy_{0,56}Fe_{0,04}Co_{0,02})_{0,9}O_{0,8}$
16	$(Pr_{0,56}Dy_{0,44})_{14,4}(Fe_{0,50}Co_{0,50})_{oct}B_{6,4}$	$A_{ц}$ $A_r$ $RF_3B_2$ $RF_2B_2$ $(R, F)O$	До 100 (78,1) — До 30 (12,5) До 25 (7,4) До 10 (1,2)	$(Pr_{0,60}Dy_{0,40})_{2,1}(Fe_{0,53}Co_{0,47})_{13,7}B_1$ $(Pr_{0,48}Dy_{0,52})_{1,9}(Fe_{0,54}Co_{0,46})_{13,6}B_1$ $(Pr_{0,45}Dy_{0,55})_{0,9}(Fe_{0,34}Co_{0,66})_{3,5}B_{2,3}$ $(Pr_{0,73}Dy_{0,27})_{1,0}(Fe_{0,37}Co_{0,63})_{2,0}B_{1,8}$ $(Pr_{0,67}Dy_{0,27}Co_{0,05})_{0,6}O_{0,4}$
17	$(Pr_{0,92}Dy_{0,08})_{13,3}(Fe_{0,50}Co_{0,50})_{oct}B_{6,9}$	$A_{ц}$ $A_r$ $RF_2B$ $RF_2B_2$ $(R, F)O$	— (86,3) — 20 (9,6) 8 (3,3) 5 (0,5)	$(Pr_{0,90}Dy_{0,10})_{2,0}(Fe_{0,52}Co_{0,48})_{14,4}B_{0,8}$ $(Pr_{0,92}Dy_{0,08})_{2,1}(Fe_{0,53}Co_{0,47})_{14,4}B_{0,7}$ $(Pr_{0,45}Dy_{0,55})_{0,6}(Fe_{0,63}Co_{0,37})_{4,0}B_{1,3}$ $(Pr_{0,97}Dy_{0,03})_{1,2}(Fe_{0,28}Co_{0,72})_{2,5}B_{1,5}$ $(Pr_{0,78}Dy_{0,03}Fe_{0,08}Co_{0,11})_{0,6}O_{1,2}$
18	$Pr_{14,5}(Fe_{0,13}Co_{0,87})_{oct}B_{5,5}$	$A_{ц}$ $A_r$ $RF_2B$ $RF_3$ $(R, F)O$	45 (66,6) — 32 (14,0) 45 (18,6) 6 (0,5)	$Pr_{2,0}(Fe_{0,13}Co_{0,87})_{13,8}B_{1,3}$ $Pr_{2,0}(Fe_{0,14}Co_{0,86})_{13,9}B_1$ $Pr_{1,0}(Fe_{0,07}Co_{0,93})_{3,3}B_1$ $Pr_{1,0}(Fe_{0,07}Co_{0,93})_{3,3}$ $(Pr_{0,81}Co_{0,19})_{0,7}O_{1,3}$

Примечание.  $A_{ц}$ ,  $A_r$  – состав основной магнитной фазы  $R_2(Fe, Co)_{14}B$  в центре зерна и у границы соответственно;  $R=Pr+Dy$ ;  $F=Fe+Co$ . Для некоторых материалов указан приблизительный размер зерна фазы, а в скобках – ее содержание в материале.



Микроструктуры ( $\times 1500$ ) материалов систем  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,4}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{oct}B_{8,0}$  (а);  $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,5}(Fe_{0,66}Co_{0,34})_{oct}B_{7,9}$  (б);  $(Pr_{0,49}Dy_{0,51})_{14,4}(Fe_{0,56}Co_{0,44})_{oct}B_{6,5}$  (в) и  $Pr_{14,5}(Fe_{0,13}Co_{0,87})_{oct}B_{5,5}$  (г)

Таблица 2

Содержание Dy в фазах в зависимости от количества Co  
в материале системы  $(Pr_{1-x}Dy_x)-(Fe_{1-y}Co_y)-B$  ( $R=Pr+Dy$ ;  $F=Fe+Co$ )

Условный номер образца	Состав материала		Содержание Dy, отн. атомн. %, в фазах				
	x	y	RF <sub>4</sub> B	RF <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	RF <sub>3</sub>	RF <sub>2</sub>	RF <sub>2</sub> B <sub>2</sub>
1	0,18	0,15	–	–	–	–	–
2	0,47	0,2	–	–	0,42	0,29	–
3	0,45	0,21	–	–	0,66	0,12	–
4	0,47	0,23	–	–	0,25	–	–
5	0,35	0,24	–	–	–	–	0,1
6	0,47	0,24	0,59	–	–	0,26	–
7	0,58	0,24	–	–	–	–	0,27
8	0,73	0,26	–	0,55	–	0,2	–
9	0,47	0,27	0,63	–	–	–	0,21
10	0,5	0,29	–	–	0,65	–	–
11	0,47	0,3	–	–	0,54	0,18	–
12	0,47	0,34	–	–	0,61	0,15	–
13	0,48	0,38	0,58	–	0,22	–	–
14	0,48	0,41	0,59	–	–	–	0,18
15	0,51	0,44	0,63	–	0,35	–	–
16	0,44	0,5	–	0,55	–	–	0,27
17	0,08	0,5	0,55	–	–	–	0,03
18	0	0,87	0	–	0	–	–

1% (объемн.) (см. табл. 1). Кроме того, размер зерен этой фазы не превышает 5 мкм (что близко к диаметру пучка электронов в установке Superprob-733), и поэтому определять содержание элементов в этой фазе с достаточной точностью невозможно. В целом можно сказать, что для фазы  $R_5F_2B_6$  характерно низкое содержание Dy ( $\leq 0,01$  атомн. долей). Содержание Co составляет  $\sim 0,8-0,9$  атомн. долей и не зависит от содержания Co в материале (см. табл. 1). Фаза  $R_3F$  обнаружена вплоть до концентрации  $y=0,26$  и при низких концентрациях Co может иметь размер зерна до 10 мкм (см. табл. 1). В этой области фаза не содержит Dy и содержание Co в ней  $\sim 0,8$  атомн. долей. Однако у образцов 4 и 8 резко изменяется состав этой фазы как по Co, так и по Dy, но делать какие-либо выводы на этот счет преждевременно, поскольку размер зерна фазы  $R_3F$  составляет всего 2–3 мкм, что резко снижает точность определения состава. Обращает на себя внимание, что содержание Dy в фазе A всегда выше в центре зерна, чем на его границе (см. табл. 1). Соответственно распределение Pr по зерну обратное. Разница по содержанию Dy составляет от 2 до 59% в зависимости от образца, причем, какой-либо закономерности от содержания Dy и Co в материале обнаружить не удалось. Единственным исключением является образец 16 (см. табл. 1). Интересно отметить, что такой закономерности в распределении Dy по зерну фазы A в материалах системы Nd–Dy–Fe–Co–B не наблюдается. Известно, что при 1050°C коэффициент диффузии ( $D$ ) для Dy ( $D_{Dy}=2,9 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с) в фазе A выше, чем у Nd ( $D_{Nd}=2,3 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с), а коэффициент диффузии

Co ( $D_{Co}=7,63 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/с) выше, чем Fe ( $D_{Fe}=3,28 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/с) [19]. Возможно величиной  $D_{Co}$ ,  $D_{Fe}$  (они на два порядка выше, чем у Dy, Nd) и объясняется отсутствие градиента в распределении Co и Fe в фазе A. Разница  $D_{Nd}$  и  $D_{Dy}$  незначительна, возможно, поэтому отсутствует закономерность в распределении Dy в фазе A материалов системы Nd–Dy–Fe–Co–B. Известно, что скорость диффузионных процессов при одинаковых температурах в сплавах системы Pr–Fe–B замедлена по сравнению с системой Nd–Fe–B [20]. По-видимому, этим и объясняется более высокое содержание Dy в центре зерна, чем на его границе. Продолжительность спекания всех образцов 1 ч. Вероятно, этого времени просто недостаточно, чтобы установилось равновесное распределение Dy и Pr по зерну фазы A. Поскольку радиус ионов  $Nd^{3+}$  и  $Pr^{3+}$  больше, чем иона  $Dy^{3+}$  (этим авторы работы [19] и объясняют разницу коэффициентов диффузии), то при спекании магнита к центру зерна фазы A первыми проходят ионы диспрозия. Причина, по которой у образца 16 (см. табл. 1) Dy в центре меньше, чем на границе, пока непонятна.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Для спеченных материалов  $(Pr_{1-x}Dy_x)_{12-17}(Fe_{1-y}Co_y)_{ост}B_6$  ( $x=0,08-0,73$ ;  $y=0,15-0,50$ ) средний состав фаз  $RF_4B$  и  $RF_3B_2$  по Dy составляет:  $(Pr_{0,4}Dy_{0,6})(Fe, Co)_4B$ ,  $(Pr_{0,4}Dy_{0,6})(Fe, Co)_3B_2$ .

2. Содержание Dy в фазе  $RF_3$  не зависит от количества Co в материале, а определяется присутствием фаз  $RF_4B$  и  $RF_3B_2$ . Кроме того, содержание Dy в фазе  $RF_3$  зависит от количества Dy в материале.

3. Содержание Dy в фазах  $RF_2$  и  $RF_2B_2$  не превышает 0,26–0,27 атомн. долей и до определенного предела слабо зависит от количества Dy в материале.

4. Содержание Dy в фазе А всегда выше в центре зерна.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бурханов Г.С., Пискорский В.П., Терешина И.С., Моисеева Н.С., Давыдова Е.А., Валеев Р.А. Существование области гомогенности по бору магнитотвердой фазы 2-14-1 // Доклады академии наук. 2012. Т. 447. №3. С. 277–279.
- 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.
- Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г., Валеев Р.А., Терешина И.С., Давыдова Е.А. Влияние термической обработки на свойства наноструктурированных магнитотвердых материалов Pr–Dy–Fe–Co–B // Металлы. 2010. №3. С. 84–91.
- Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
- Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).
- Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
- Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорочкин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования композиционных композитных материалов с интегрированной электромеханической системой // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
- Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнотермически легированных сплавов с применением эталона // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 9–11.
- Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г., Валеев Р.А., Терешина И.С. Эффект Вестендорпа на магнитах Pr(Nd)–Dy–Ce–Fe–Co–B // Перспективные материалы. 2010. №3. С. 22–25.
- Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г., Валеев Р.А., Терешина И.С., Давыдова Е.А. Расчет температурного коэффициента индукции наноструктурированных магнитотвердых материалов Pr–Dy–Gd–Fe–Co–B методом молекулярного поля // Металлы. 2010. №1. С. 64–67.
- Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Мельников С.А., Паршин А.П., Валеев Р.А., Терешина И.С., Иванов С.И. Влияние содержания неодима на свойства наноструктурированных материалов Nd(Pr)–Fe–B, полученных по бинарной технологии // Перспективные материалы. 2010. №9. С. 195–197.
- Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Валеев Р.А., Моисеева Н.С., Степанова С.В., Петраков А.Ф., Терешина И.С., Репина М.В. Термостабильные кольцевые магниты с радиальной текстурой на основе Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B // Физика и химия обработки материалов. 2011. №3. С. 43–47.
- Мельников С.А., Пискорский В.П., Беляев И.В., Валеев Р.А., Верклов М.М., Иванов С.И., Оспенникова О.Г., Паршин А.П. Температурные зависимости магнитных свойств спеченных сплавов Nd–Fe–B, легированных сплавами РЗМ с переходными металлами // Перспективные материалы. 2011. №11. С. 201–207.
- Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г., Терешина И.С., Валеев Р.А., Моисеева Н.С. Влияние бора на магнитные свойства магнитов на основе интерметаллидов с тетрагональной структурой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 143–148.
- Магнитный материал и изделие, выполненное из него: пат. 2368969 Рос. Федерация; опубл. 27.09.2007.
- Каблов Е.Н., Петраков А.Ф., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Чабина Е.Б. Влияние церия и иттрия на магнитные свойства и фазовый состав материала системы Nd–Dy–Fe–Co–B // МиТОМ. 2005. №10. С. 25–29.
- Каблов Е.Н., Петраков А.Ф., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Чабина Е.Б. Влияние празеодима на магнитные свойства и фазовый состав материала системы Nd–Pr–Dy–Fe–Co–B // МиТОМ. 2005. №6. С. 12–16.
- Каблов Е.Н., Петраков А.Ф., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Назарова Н.В. Влияние диспрозия и кобальта на температурную зависимость намагниченности и фазовый состав материала системы Nd–Dy–Fe–Co–B // МиТОМ. 2007. №4. С. 3–10.
- Cook B.A., Harringa J.L., Laabs F.C., Dennis K.W., Russel A.M., Mc Callum R.W. Diffusion of Fe, Co, Nd and Dy in  $R_2(Fe_{1-x}Co_x)_{14}B$  where R=Nd or Dy // J. Magn. Magn. Mater. 2001. V. 233. P. L136–L141.
- 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 // J. of Alloys and Compounds. 2000. V. 296. P. 223–228.